



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**LETECKÝ ÚSTAV**

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**TERMOPLASTICKÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY A  
JEJICH POUŽITÍ NA LETECKÝCH KONSTRUKCÍCH**

APPLICATION OF THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS ON AIRCRAFT STRUCTURES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Lucie Vráblíková

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Klement, CSc.

**BRNO 2018**



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Studentka: **Lucie Vráblíková**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Klement, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Termoplastické kompozitní materiály a jejich použití na leteckých konstrukcích**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Kompozitní materiály na bázi termoplastických matric vyztužené vlákny mají oproti reaktoplastovým kompozitům specifické výhody a nedostatky, které limitují jejich aplikaci na leteckých konstrukcích. Obsahem řešeného úkolu je shromáždění dostupných nejnovějších poznatků o termoplastických leteckých kompozitech, jejich výrobních technologiích a konkrétním použití.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Přehled a charakteristika leteckých termoplastických vláknových kompozitních materiálů, výrobních technologiích a konkrétního použití na leteckých konstrukcích.

#### **Seznam doporučené literatury:**

ASM Handbook, vol. 21. Composites. ASM International. Material Park, Ohio, 2002. ISBN 0-87117-703-9.

CAMPBELL, F. C.: Manufacturing technology for aerospace structural materials. Elsevier Ltd., 2006. ISBN-10: 1-85-617495-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá termoplastickými kompozitními materiály v leteckém průmyslu. Cíle bakalářské práce jsou rozděleny do tří částí. První část práce obsahuje přehled základních vlastností vláknových termoplastů, jejich složení a charakteristiku. V druhé části jsou uvedeny různé technologie výroby termoplastů. Poslední část se zabývá aplikacemi termoplastických kompozitních materiálů v leteckém průmyslu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Termoplasty v letectví, kompozit, termoforming

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with thermoplastic composite materials in aircraft industry. The aims of the thesis are divided into three parts. The first part contains an overview of the basic properties of fibre-reinforced thermoplastics, their structure and characteristics. In the second part, there are introduced different technologies of manufacturing thermoplastics. The last part deals with applications of thermoplastic composite materials in aircraft industry.

## **KEY WORDS**

Thermoplastics in aviation, composite, thermoforming

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VRÁBLÍKOVÁ, L. *Termoplastické kompozitní materiály a jejich použití na leteckých konstrukcích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 51 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Klement, CSc..



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Termoplastické kompozitní materiály a jejich použití na leteckých konstrukcích* vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 22. května 2018

---

Lucie Vráblíková





## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a za svůj čas, který mi věnoval.

Současně bych také chtěla poděkovat své rodině, která mě během studia podporovala.

Lucie Vráblíková



## OBSAH

1	ÚVOD.....	13
2	PŘEHLED TERMOPLASTICKÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	15
2.1	Matrice .....	15
2.2	Výztuž.....	17
2.2.1	Skleněná vlákna.....	17
2.2.2	Uhlíková vlákna .....	18
2.2.3	Aramidová vlákna .....	20
2.2.4	Bórová vlákna .....	20
2.3	Struktura a vlastnosti vláknových kompozitů.....	21
2.3.1	Vrstvení .....	22
2.3.2	Hybridní tkaniny .....	23
2.4	Prepregy .....	24
3	TECHNOLOGIE VÝROBY .....	27
3.1	Kladení prepregů.....	28
3.2	Konsolidace termoplastů.....	28
3.2.1	Lisování mezi deskami.....	29
3.2.2	Lisování mezi pásy.....	29
3.2.3	Konsolidace v autoklávu .....	30
3.2.4	Kladení „in-situ“ .....	30
3.3	Termoforming.....	31
3.3.1	Hydroforming.....	33
3.3.2	Tváření membránou .....	34
4	PRAKTICKÉ APLIKACE.....	37
5	ZÁVĚR.....	43
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	45
	SEZNAM ZKRATEK.....	48
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	49
	SEZNAM TABULEK.....	50



# 1 ÚVOD

Kompozitní materiál je složen ze dvou či více makroskopicky rozeznatelných fází, které se podílejí na výsledných vlastnostech materiálu. Typicky jsou kompozity tvořeny maticí a výztuží. Výztuž, jež dodává materiálu tuhost a pevnost, je zasazena do prostředí matrice za účelem spojení fází a dodání tvaru materiálu. Samotná výztuž může být ve formě vláken, nebo částic, podle čehož se kompozity dělí na vláknové a částicové. Podle druhu matrice se kompozitní materiály dělí na kompozity s polymerní, kovovou a keramickou maticí. Určité uplatnění mají i kompozity s uhlíkovou a skleněnou maticí a kompozity hybridní.

Největší využití v leteckém průmyslu zastupují kompozity s polymerní maticí, která může být na bázi reaktoplastů (termosetů) nebo termoplastů. Termoplastické a reaktoplastické matrice mají podobné mechanické vlastnosti a mohou být kombinovány s uhlíkovými, skleněnými případně jinými vlákny. Reaktoplastické matrice v leteckých kompozitních materiálech převažují díky své vysoké kvalitě, vyspělejší výrobním procesům, komercializovaným cenám a dobře zavedenému dodavatelskému řetězci. Naopak termoplastické kompozitní materiály jsou na leteckých konstrukcích používány méně kvůli vysokým výrobním nárokům. V poslední době však dochází k rozvoji nových technologií a termoplasty jsou stále častěji zvažovány pro nové aplikace [1].

Termoplastické kompozitní materiály mají oproti reaktoplastickým určité výhody, ale i nevýhody. Termoplastické a reaktoplastické materiály se výrazně liší v teplotním rozmezí výrobních procesů a nárocích na skladování. Reaktoplasty jsou zpracovávány v rozmezí teplot od 20 °C do 120 °C a během dalšího zahřívání dochází k vytvrzení. Jelikož jsou vytvrzovací teploty poměrně nízké je potřeba reaktoplastické prepregy<sup>1</sup> skladovat v mrazácích. Trvanlivost skladovaných prepregů je omezená na 6–12 měsíců. Další nevýhodou reaktoplastů je jejich nerecyklovatelnost [2], [3].

Oproti tomu výroba termoplastických prepregů a kompletních součástí vyžaduje vyšší procesní teploty, které se pohybují mezi 200 °C až 400 °C. Hlavní výhodou oproti reaktoplastům je neomezená životnost při pokojové teplotě, díky níž není potřeba skladovaný materiál uchovávat v mrazácích. Termoplastické kompozitní materiály jsou recyklovatelné a mohou být opětovně roztaveny a tvářeny [2].

---

<sup>1</sup> Prepregy (z angl. pre-impregnated fibres, předimpregnovaná vlákna) jsou polotvarem vláknových kompozitů, ve kterém jsou výztužující vlákna prosycena maticí.



## 2 PŘEHLED TERMOPLASTICKÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

### 2.1 Matrice

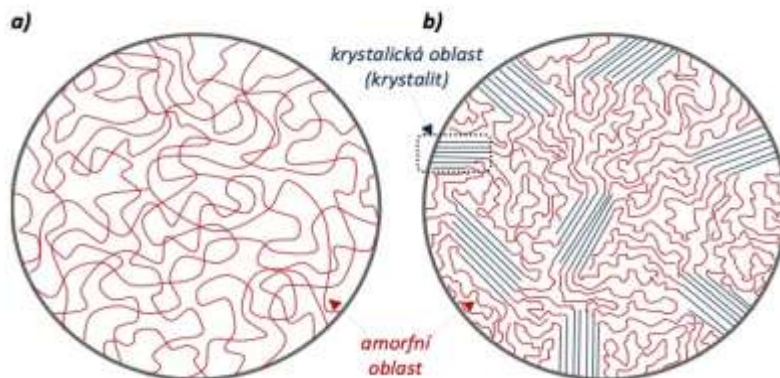
Matrice zastupuje v kompozitu několik funkcí, mezi které patří především schopnost vázat výztuž v kompaktní celek, a zároveň udržovat jednotlivá vlákna bez vzájemného dotyku, čímž předchází spojitému šíření trhliny. Matrice tedy slouží jako pojivo, a tuto funkci si zachovává i po prvních poruchách výztuže [4]. Dále umožňuje efektivní přenos vnějšího zatížení na výztuž. V neposlední řadě chrání výztuž před vlivy vnějšího prostředí a určuje další vlastnosti kompozitu, jako jsou např.: teplotní a chemická odolnost, odolnost proti stárnutí a elektrické vlastnosti.

Termoplasty se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi a zachovávají si původní tvar při vystavení změně teplot. Oproti reaktoplastickým matricím mají větší houževnatost, větší prodloužení při lomu a vyšší schopnost snášet poškození, ale i výrazně vyšší teploty zpracování. Díky schopnosti opakovatelného tavení je recyklace a zpracování termoplastů snadnější. Nicméně i přes mnohé výhody mají termoplasty několik nevýhod a omezení, které limitují jejich aplikace. Stěžejním nežádoucím jevem je měknutí při zvýšených teplotách a závislost vlastností na teplotě [1].

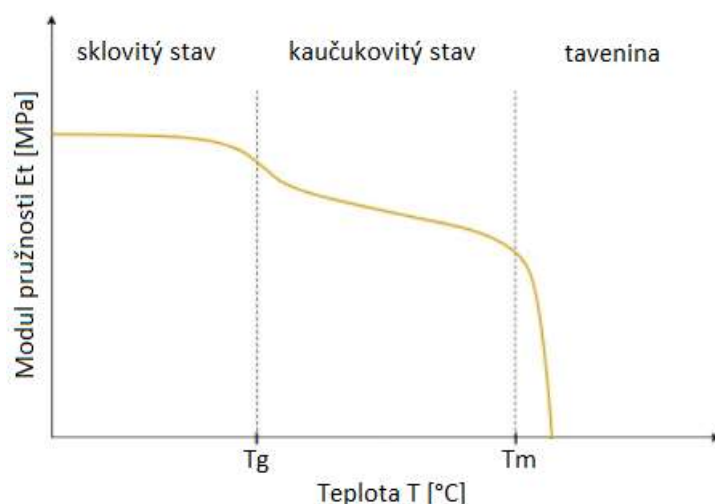
Termoplastické materiály se dělí podle morfologie na semikrystalické a amorfní, viz obrázek 2.1.

**Semikrystalické látky** mají do určité míry molekuly polymerních řetězců uspořádány pravidelně – oblasti uspořádaných makromolekul jsou obklopeny makromolekulami v neuspořádaném amorfním stavu. Proces tvorby krystalické struktury, tzv. krystalizace, probíhá především ve fázi chlazení taveniny. S vyšším podílem krystalického obsahu se zvyšuje tuhost pryskyřice a odolnost vůči rozpouštědlům. U semikrystalických látek dochází v oblasti teplot skelného přechodu ( $T_g$ ) ke změnám, především ztrátě tvrdosti, jež se týkají pouze amorfní části polymeru. Tání krystalické složky probíhá skokově při teplotě tání ( $T_m$ ), viz obrázek 2.2 na další straně. Teoretickou hranicí použití semikrystalických termoplastů tvoří teplota tání, avšak maximální pracovní teplota je v praxi o 50–100 °C nižší. Rozmezí výrobních teplot se pohybuje nad  $T_m$ .

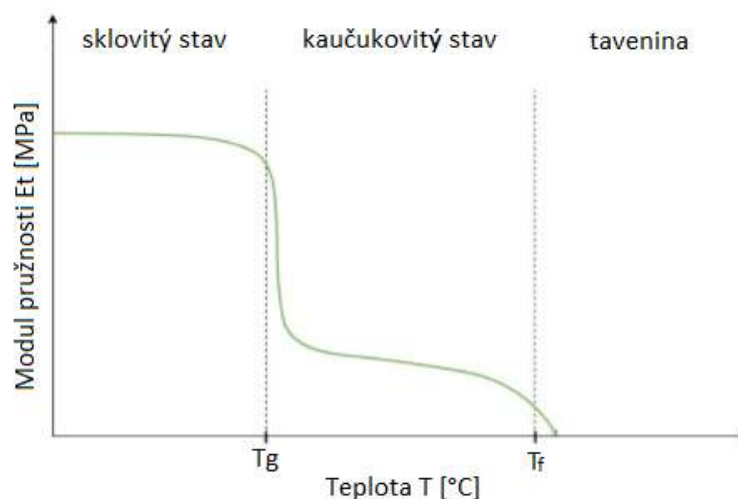
**Amorfní látky** postrádají zákonitosti v molekulárním uspořádání a nevykazují konkrétní hodnotu teploty tání. S rostoucí teplotou měknou a po překročení teploty skelného přechodu ( $T_g$ ) dochází ke skokové ztrátě pevnosti, deformaci součásti a ztrátě funkčnosti. Z tohoto důvodu se horní použitelná hranice teplot u amorfních termoplastů volí v průměru o 50 °C nižší než  $T_g$ . Další charakteristickou teplotou pro amorfní látky je teplota viskózního toku ( $T_f$ ), při které klesá modul pružnosti na nulovou hodnotu a dochází k přechodu v taveninu (obr. 2.3). Při teplotách vyšších než  $T_f$  dochází ke zpracování technologickými procesy. Amorfní i semikrystalické polymery mají anizotropní vlastnosti, jež závisí na podmínkách tuhnutí [1], [3], [5].



**Obrázek 2.1** a) amorfní polymer b) semikrystalický polymer [3]



**Obrázek 2.2** Závislost modulu pružnosti  $E_t$  na teplotě  $T$  u semikrystalického termoplastu [3]



**Obrázek 2.3** Závislost modulu pružnosti  $E_t$  na teplotě  $T$  u amorfního termoplastu [3]

Mezi vysokoteplotní termoplasty patří polyetereterketon (PEEK), polyfenylsulfid (PPS), polyeterimid (PEI), polyeterketonketon (PEKK), polyetersulfon (PES) aj., jež si zachovávají termoplastický charakter ve finálním kompozitu. Druhou skupinu tvoří materiály, které jsou původně vytvarovány jako termoplasty a následně jsou modifikovány a vytvrzeny za účelem vytvoření částečně reaktoplastického charakteru. U těchto materiálů dochází ke zvýšení teplotní odolnosti. Typickým zástupcem je polyamidimid (PAI), těmito typy se dále nebudeme zabývat. Makrostruktura a charakteristické teploty zmiňovaných termoplastů jsou uvedeny v tabulce 2.1 [1].

**Tabulka 2.1** Typy polymerů a jejich charakteristické teploty [1]

Polymer	Makrostruktura	Teplota skelného přechodu $T_g$ [°C]	Teplota tání $T_m$ [°C]	Rozmezí výrobních teplot [°C]
PPS	semikrystalická	88	285	329–343
PEI	amorfní	218	-	316–360
PEEK	semikrystalická	143	345	382–399
PEKK	semikrystalická	156	310	327–360



Kompozitní materiály prosperují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi při poměrně nízké hmotnosti. Typické vlastnosti některých termoplastických matric jsou uvedeny v tabulce 2.2. Konečné vlastnosti kompozitního materiálu závisí především na kombinaci matrice a výztuže. Vhodným spojením jednotlivých fází lze vyrobit materiál s unikátními materiálovými charakteristikami [1].

**Tabulka 2.2** Mechanické vlastnosti termoplastických matric [1]

Termoplast	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Modul v ohybu [MPa]
PEI	1,27	104	145	3,3
PES	1,37	84	129	2,5
PPS	1,34	74	96	4,1
PEEK	1,32	100	110	3,8

## 2.2 Výztuž

Významnou složku kompozitních materiálů tvoří výztuž, která slouží k přenosu zatížení. Vlákná dodávají materiálu pevnost a tvrdost, čímž ovlivňují mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Vlákná mohou prosperovat i dalšími vlastnostmi jako například odolností vůči vysokým teplotám a odolností proti creepu<sup>2</sup>.

Výztuž může být ve formě vláken nebo částic, podle čehož dělíme kompozity na vláknové a částicové. K nejúčinnějšímu přenosu zatížení dochází u výztuže ve formě dlouhých (spojitých) vláken, kdežto krátká (nespojité) vlákna vykazují o něco menší účinnost. Dále se budeme zabývat pouze vláknovými kompozity [1].

Vlákná se pro další použití spojují ve svazky, které jsou dále zpracovávány na následující polotovary:

- Pramence – svazky vzájemně nezkroutených vláken
- Rovingy – soubory paralelních pramenců s malým nebo žádným zkroutením
- Příze – spojitě svazky zkroutených vláken nebo pramenců, využívají se pro výrobu tkanin a pletenin

Kompozitní materiály s polymerní matricí vyztuženou vlákny dosahují vysokých hodnot měrné pevnosti<sup>3</sup> a měrného modulu<sup>4</sup>. Pro letecké konstrukce se v kompozitních materiálech s polymerní matricí používají nejčastěji vlákna skleněná, uhlíková, aramidová a v menší míře vlákna bórová. Pro vyztužení polymerních matric se nepoužívají vlákna kovová ani keramická, jelikož by měla větší hustotu a zmenšovala by měrnou pevnost a měrný modul kompozitu [6].

### 2.2.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou amorfní a jejich pevnost značně závisí na stavu povrchu. Při manipulaci s vlákny dochází k abrazi, která má negativní vliv na pevnost vláken. Vzájemnému poškození se předchází nanesením tenkého ochranného povlaku, tzv. lubrikace (vosky, maziva). Takto ošetřená vlákna mohou být dále zpracovávána na technické tkaniny. Pro zlepšení adheze mezi matricí a vláknem jsou při výrobě kompozitních dílů přidávány vazebné prostředky. Skleněná vlákna se typicky vyrábí o průměru 5–25 µm [4].

<sup>2</sup> Creep, nebo-li tečení materiálu, způsobený dlouhodobým zatížením součásti za zvýšených teplot.

<sup>3</sup> Měrná pevnost udává poměr pevnosti v tahu k hustotě kompozitu, ( $R_m/\rho_k$ ).

<sup>4</sup> Měrný modul udává poměr modulu pružnosti k hustotě kompozitu, ( $E/\rho_k$ ).

Skleněná vlákna jsou nejlevnějším typem výztuže kompozitních materiálů. Mezi jejich přednosti patří vysoká pevnost, nehořlavost a malá tepelná roztažnost. Jejich hlavní nevýhodou je změna vlastností při účinku různých vlivů (např. průměr vláken). Skleněná vlákna jsou křehká a mají nízký modul pružnosti. Hustota závisí na chemickém složení a pohybuje se okolo 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Hmotnost skleněných vláken je mírně vyšší než u ostatních typů vláken.

Pro výrobu kompozitních materiálů v leteckém průmyslu se nejčastěji používají skla typu E, S a D. Chemické složení zmiňovaných skel je uvedeno v tabulce 2.3 [5].

**Tabulka 2.3** Složení oxidů ve skleněných vláknech [7]

Typ	Chemické složení [%]								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F <sub>2</sub>
E sklo	52–56	12–16	5–10	16–25	0–5	0–2	0–1,5	0–0,8	0–1
S-2 sklo	64–66	24–25		0–0,1	9,5–10	0–0,2		0–0,1	
D sklo	72–75	0–1	21–24	0–1		0–4		0–0,3	

**E-sklo** má velmi nízkou elektrickou vodivost. Vlákna vyrobená z E skloviny představují nejlevnější variantu ze zmiňovaných skel. Mechanické vlastnosti jsou v porovnání se sklem S o něco horší. Uplatnění nachází na kluzácích a lehkých letadlech.

**S-sklo** má větší podíl oxidu křemíku a hliníku, je až 4× dražší a má lepší mechanické vlastnosti než E-sklo. Díky kombinaci velmi dobrých mechanických, teplotních a chemických vlastností nachází uplatnění v leteckém i vojenském průmyslu.

**D-sklo** má dobré dielektrické vlastnosti. Používá se na výrobu radomů<sup>5</sup>. Mechanické vlastnosti – pevnost, tažnost a modul pružnosti jsou uvedeny v tabulce 2.4. Působením vzdušné vlhkosti a minerálních kyselin dochází k poklesu pevnosti [1].

**Tabulka 2.4** Mechanické vlastnosti skleněných vláken při pokojové teplotě (23 °C) [7]

	Pevnost v tahu [MPa]	Youngův modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
E sklo	3445	72,3	4,8	2,5
S-2 sklo	4890	86,9	5,7	2,5
D sklo	2415	51,7	4,6	2,2

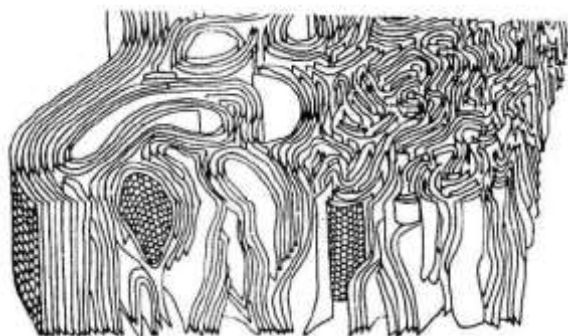
### 2.2.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou krystalická. Bazální roviny hexagonální mřížky (aromatické roviny) jsou ve vláknu přednostně orientovány ve směru podélné osy vlákna. Tato orientace způsobuje anizotropii. Zatímco podél vlákna je zachována vysoká pevnost, napříč vlákna je pevnost velice nízká. Struktura vlákna je vrstevnatá, viz obrázek 2.4 na další straně [4].

Vlastnosti kompozitu mohou být měněny vhodnou orientací vláken, díky čemuž mají uhlíková vlákna široké spektrum mechanických vlastností [6]. Ohebnost vláken je zaručena menšími průměry, které činí 5–8 μm. Oproti vláknům skleněným jsou uhlíková poměrně křehká. Hustota vláken je nízká (1,8–2,2 g/cm<sup>3</sup>), tudíž zaručuje úsporu hmotnosti. Významné

<sup>5</sup> Radom – aerodynamický kryt radaru

zastoupení nachází nejen na leteckých konstrukcích dopravních tryskových letadel (Boeing 787 a Airbus 350 XWB), ale i v jiných průmyslových odvětvích [1].



**Obrázek 2.4** Struktura uhlíkového vlákna [5]

Uhlíková vlákna se vyrábějí převážně z vláken polyakrylonitrilu (PAN) nebo ze smol<sup>6</sup>. Vlákná se povrchově upravují za účelem snížení vzájemného poškozování a pro lepší soudržnost s polymerní matricí.

Výroba pyrolýzou organických vláken z PAN může být rozdělena do tří etap:

- Stabilizace – dochází ke stabilizaci PAN vlákna při teplotách 220–300 °C v oxidačním prostředí. Vláknko se stává netavitelným.
- Karbonizace – odstranění vodíku, snížení obsahu dusíku a kyslíku při teplotách 1000–1500 °C v inertním prostředí. Vláknko (80 až 90 % hmoty tvořeno uhlíkem) má maximální pevnost v tahu.
- Grafitizace – zvýšení obsahu uhlíku a vznik dokonalejší mikrostruktury při teplotách 1800–3000 °C v inertním prostředí [1].

Pokud není při tepelném zpracování překročena teplota 1000 °C, uhlíková vlákna mají menší modul pružnosti a malou pevnost. Řízením pyrolýzy lze získat několik druhů uhlíkových vláken, mezi které patří:

- HT (High Tenacity) – karbonizovaná vlákna s dobrou tažností a nižší pevností v tahu
- IM (Intermediate Modulus) – vlákna vysoce pevná se středním modulem pružnosti
- HM (High Modulus) – grafitizovaná vlákna s vysokým modulem pružnosti a nižší tažností
- UHM (Ultra High Modulus) – grafitizovaná vlákna (3000 °C) s velmi vysokým modulem pružnosti [8]

Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tabulka 2.5** Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [1]

Materiál	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
HT	3450–4830	220–241	1,5–2,2	1,8
IM	3450–6200	290–297	1,3–2,0	1,8
HM	3450–5520	345–448	0,1–1,0	1,9
UHM	2410	690–965	0,27–0,4	2,2

<sup>6</sup> Smoly – zbytky po destilaci černého uhlí a ropy

### 2.2.3 Aramidová vlákna

Aramid, nebo-li aromatický polyamid, díky své nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a vysoké houževnatosti našel uplatnění v kompozitních materiálech. Nicméně při tlakovém namáhání v kolmém směru na osu vlákna dochází snadno k plastické deformaci, proto se aramidová vlákna často kombinují s jinými vlákny za vzniku hybridních tkanin. Průměr aramidových vláken se pohybuje okolo 12  $\mu\text{m}$ . Stěžejním nedostatkem aramidových vláken je degradace materiálových charakteristik při působení slunečního záření [1], [6].

Aramidová vlákna se dělí podle velikosti modulu pružnosti na:

- aramid LM (Low Module) - nízký modul pružnosti, využívá se na výrobu ochranných oděvů, neprůstřelných vest
- aramid HM (High Module) - vysoký modul pružnosti, využívá se na výrobu kompozitů v leteckém a automobilovém průmyslu
- aramid UHM (Ultra High Module) - velmi vysoký modul pružnosti, využívá se v leteckém průmyslu [8]

Mezi přední výrobce patří americká firma Du Pont, která nabízí aramidová vlákna pod obchodním názvem Kevlar<sup>®</sup> a japonská firma Teijin s obchodní značkou Twaron<sup>®</sup>. Mechanické vlastnosti vybraných vláken jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tabulka 2.6** Mechanické vlastnosti aramidových vláken [9]

Materiál	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
LM (Kevlar 29)	3600	83	3,6	1,44
HM (Kevlar 49)	3600	124	2,4	1,44
UHM (Kevlar 149)	3400	146	2	1,47
Twaron 930	3000	125	2	1,45

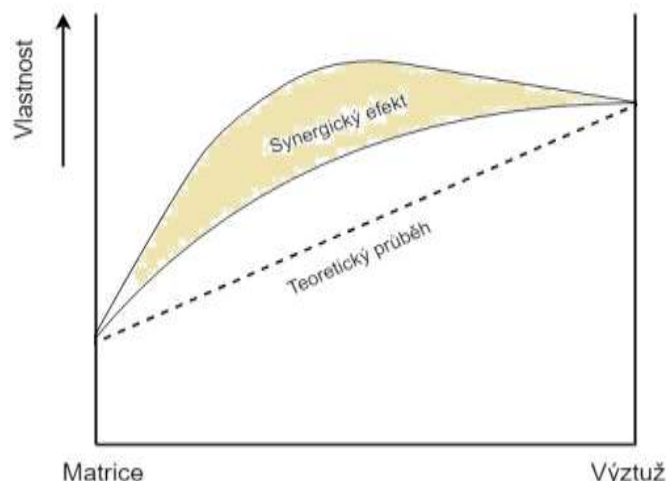
### 2.2.4 Bórová vlákna

Bórová vlákna jsou velmi drahá kvůli nízké produktivitě výroby. Jednou z technologií výroby je chemická depozice z plynné fáze (CVD – Chemical Vapor Deposition), která spočívá v kondenzaci plynného bóru na vláknovém substrátu. Nejdříve dochází k zahřátí chloridu boritého ( $\text{BCl}_3$ ) na teplotu 1300  $^{\circ}\text{C}$ , při které probíhá rozpad  $\text{BCl}_3$  na plynný bór a páry chlorovodíku ( $\text{HCl}$ ). Vláknový substrát, který může být ve formě wolframového nebo uhlíkového vlákna o průměru 12  $\mu\text{m}$ , se zahřívá průchodem elektrického proudu. Usazením vyloučeného bóru na rozžhaveném vlákně vzniká bórové vlákno s velmi jemnou krystalickou strukturou, které dosahuje průměru až 0,1 mm [10].

Oproti ostatním vláknům mají bórová vlákna větší pevnost v tlaku (6,9 GPa) než v tahu (3,45 GPa) a mají větší tvarovou stabilitu při tlakovém namáhání. Nevýhodou bórových vláken je o něco vyšší hustota (2,5 g/cm<sup>3</sup>) a křehkost. Kvůli vysoké ceně se čistě bórová vlákna používají zřídka, častěji jsou kombinována s vlákny uhlíkovými. Hlavní oblastí využití bórových vláken je v místech, kde je potřeba zpevnit součást vůči tlakovému namáhání [4].

### 2.3 Struktura a vlastnosti vláknových kompozitů

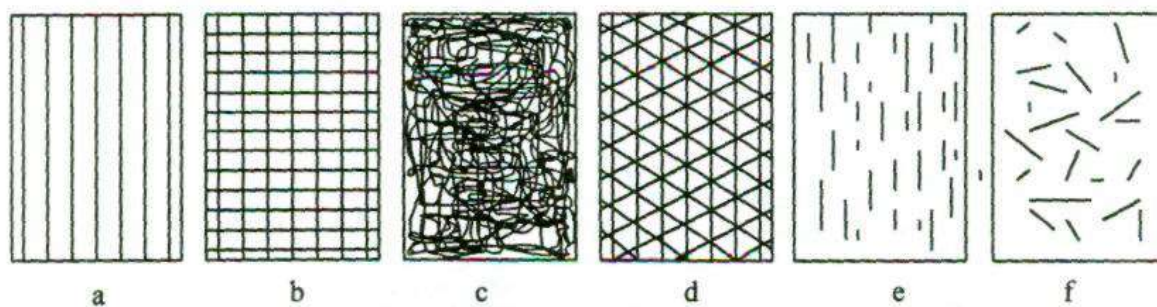
Výsledné mechanické vlastnosti vláknového kompozitu závisí na druhu použitého vlákna, objemovém podílu vláken v kompozitu a na jejich orientaci. Spolupůsobením matrice a vláken dochází k tzv. synergetickému efektu, který zapříčiňuje zesílení účinku jednotlivých složek (obrázek 2.5). Díky tomuto efektu dosahuje kompozit lepších vlastností než poměrnému součtu odvozenému z vlastností jednotlivých složek [11].



**Obrázek 2.5** Znáznornění synergetického efektu v kompozitu [11]

Vláknové kompozity mají výztuž ve formě spojitých vláken, čímž dosahují mnohem pevnější struktury. Pevnost vláken závisí na velikosti průřezu a délce. Se zmenšujícím se průřezem pevnost roste. U malých průměrů vláken je pravděpodobnost výskytu defektu struktury o něco menší než u větších průměru. Navíc nedokonalosti, které se u vláken malých průměrů vyskytují, jsou také malé. Většina vyráběných vláken je kruhového průřezu o průměru od 5 do 20  $\mu\text{m}$ . Menší průměry se nepoužívají kvůli nemožnosti dokonalého prosycení maticí.

Vlákna mohou být různě uspořádána, od čehož se odvíjí výsledné vlastnosti materiálu. Kompozity se spojitými vlákny mohou mít výztuž orientovanou jednosměrně, dvousměrně ve formě tkaniny, víceose nebo nahodile. Kompozity s nespojitými vlákny mohou být orientovány jednosměrně nebo nahodile. Příklady uspořádání jsou znázorněny na obrázku 2.6 [6].



**Obrázek 2.6** Uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné b) tkanina c) rohož d) víceose uspořádání dlouhých vláken e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná f) krátká vlákna nahodile orientovaná [6]

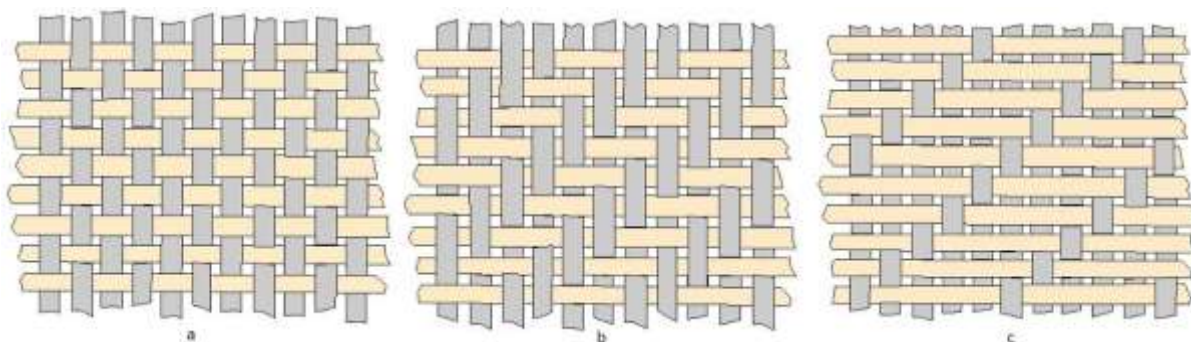
Pro aplikace, kde je potřeba mít vlákna orientována ve více směrech, se používá kombinace natočení vláken o určitý úhel, čímž vzniká tkanina. Tkaniny se vyrábějí propletením vláken osnovy a útku. Osnova (warp) je soustava rovnoběžných nití, do kterých je zanášen útek (weft), nit proplétaná osnovou v příčném směru. Vlastnosti materiálu jsou v obou směrech

roviny výztuže velmi podobné, avšak kolmo na tuto rovinu jsou nízké. Splývavost<sup>7</sup>, hladkost povrchu a stabilita tkaniny závisí především na stylu vazby. Mezi nejpoužívanější vazby patří vazba plátěná, keprová a saténová (obrázek 2.7) [12].

**Plátěná vazba** – Každé osnovní vlákno střídavě prochází pod každým vláknem útku a nad ním. Tkanina je symetrická, má dobrou stabilitu a přiměřenou pórovitost. Nicméně splývavost plátěné vazby je nejhorší ze zmiňovaných vazeb. Vysoké zvlnění vlákna přináší relativně nízké mechanické vlastnosti, tudíž nemá tendenci být používána pro velmi těžké tkaniny. Plátěná vazba je vhodná pro rovinné výrobky.

**Keprová vazba** – Jedno či více osnovních vláken se střídavě proplétá pod dvěma nebo více vlákny útku a nad nimi. Keprová vazba vykazuje velmi dobrou splývavost s mírným snížením stability oproti vazbě plátěné. Díky sníženému zvlnění má tkanina hladší povrch a mírně vyšší mechanické vlastnosti.

**Saténová vazba** – Je v podstatě keprová vazba upravená tak, aby vytvářela méně průsečíků osnovy a útků. Saténová vazba je velmi plochá a má výbornou splývavost. Minimální zvlnění poskytuje tkanině velmi dobré mechanické vlastnosti. Avšak je třeba vzít v úvahu nízkou stabilitu a asymetrii, kde jedna strana tkaniny má vlákna orientována převážně ve směru osnovy, zatímco druhá strana má vlákna orientována převážně ve směru útku, načež musí být dbáno při případném vrstvení tkanin [12].



**Obrázek 2.7** Vazby tkanin a) plátěná b) keprová c) saténová [13]

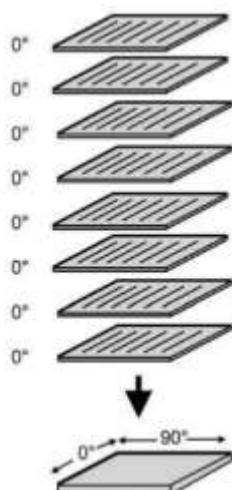
### 2.3.1 Vrstvení

Kompozity mohou být jednovrstvé nebo vícevrstvé. Jako jednovrstvý kompozit je definován kompozitní materiál složený z několika samostatných vrstev, avšak za předpokladu stejné orientace vláken a vlastností. Taktéž se mezi ně řadí kompozity tvarované litím do forem obsahující diskontinuální vlákna. Vícevrstvé kompozity se skládají z několika vrstev. Každá z vrstev představuje jednovrstvý kompozit a jeho orientace závisí na konstrukční předloze.

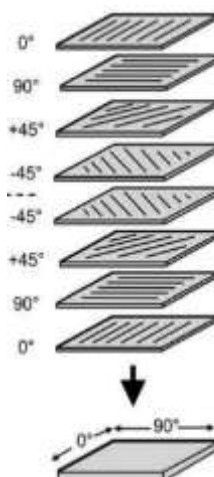
Lamináty vznikají skládáním elementárních vrstev výztuží s kontinuálními vlákny na sebe, čímž je vymezena potřebná tloušťka stěny kompozitních dílů [6]. Vlastnosti vzniklého laminátu jsou silně závislé na orientaci vláken v jednotlivých vrstvách. Pro zachování tvarové stability při změnách teploty se lamináty navrhují symetrické vůči střední rovině. Jednosměrný laminát (obrázek 2.8) představuje kompozit se silně anizotropními vlastnostmi, kdy materiál dosahuje maximálních hodnot ve směru vláken a minimálních ve směru kolmém na vlákna [1].

Vícesměrný laminát, tzv. kvazi-izotropní, má jednotlivé vrstvy natočené o určitý úhel, čímž dosahuje zdánlivě izotropního charakteru. Mezi typicky kvazi-izotropní laminát patří uspořádání vrstev pod úhly  $[0/90/+45/-45/-45/+45/90/0]$ , viz obrázek 2.9. Natočení vrstev lze různě kombinovat pro dosažení potřebných vlastností [8].

<sup>7</sup> Splývavost je schopnost tkaniny se přizpůsobit komplexnímu povrchu.



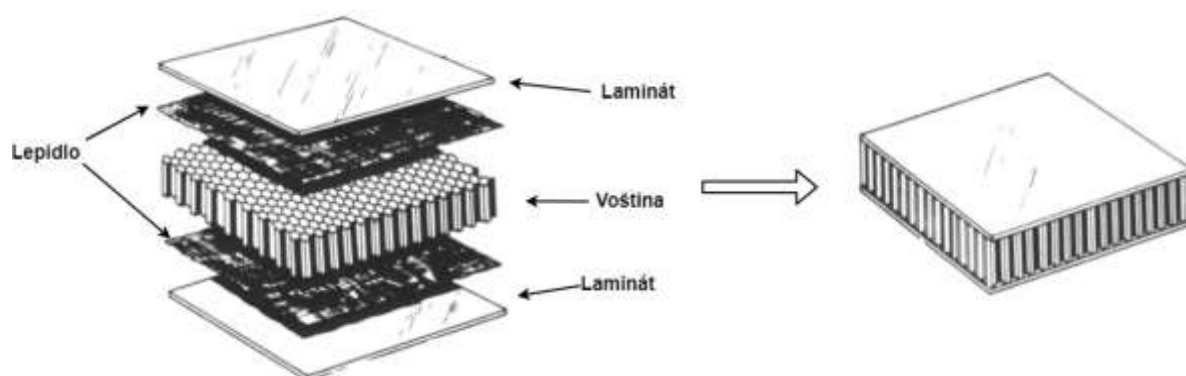
**Obrázek 2.8** Struktura jednosměrného laminátu [14]



**Obrázek 2.9** Struktura kvazi-izotropního laminátu [14]

Dalším typem vícevrstevných kompozitů jsou sendviče, které dosahují vysoké únosnosti při ohybovém namáhání. Obvykle se sendvičová struktura skládá ze dvou relativně tenkých, tuhých ploch oddělených poměrně širokým lehkým jádrem ve formě voštiny (viz obrázek 2.10), pěnové hmoty, popř. distanční skleněné tkaniny [1], [15].

Lehké a tuhé sendvičové panely jsou důležitým prvkem mnoha moderních návrhů interiérů letadel. Sendvičové konstrukce také fungují jako tepelná izolace, tlumič vibrací a hluku, čímž přispívají komfortu cestujících. V porovnání s lamináty dosahují menší odolnosti proti poškození, avšak jsou výrazně lehčí. Nezbytné vyztužení a dokončení okrajů panelů může být poměrně nákladné a časově náročné [16].



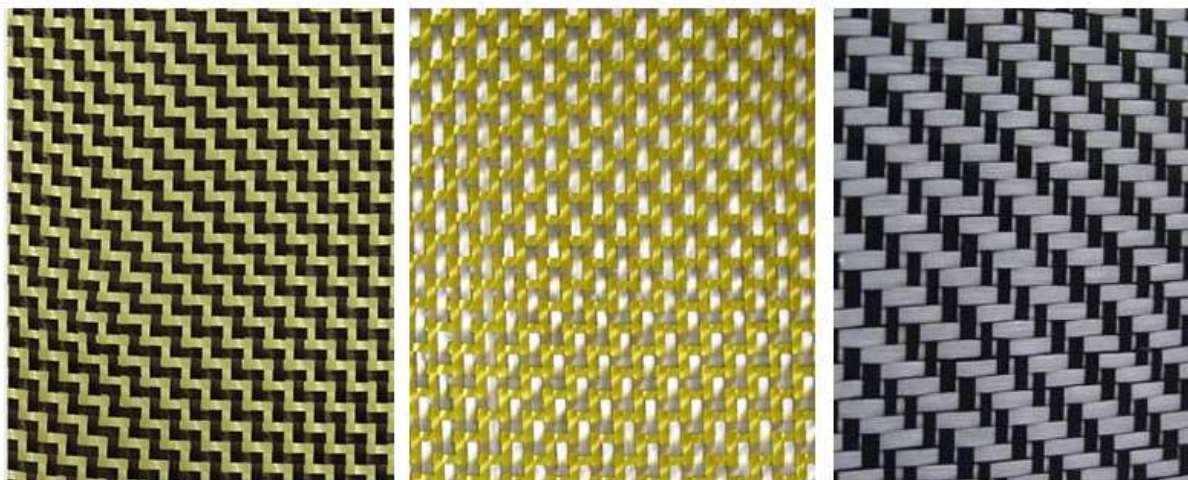
**Obrázek 2.10** Struktura sendviče s voštinovým jádrem [16]

### 2.3.2 Hybridní tkaniny

Jeden druh materiálu vláken lze v tkaninách kombinovat i s jinými druhy vyztužujících vláken, čímž vznikají tzv. hybridní tkaniny. U vícevrstvého laminátu mohou být jednotlivé vrstvy tvořeny z různých typů tkanin s různými vlákny. Nicméně pokud je požadována nízká hmotnost, popř. extrémně malá tloušťka laminátu, je možné dvě vlákna zanést do jedné vrstvy a vytvořit tak jednovrstvou hybridní tkaninu. Struktura hybridní tkaniny je tvořena jedním typem vlákna proplétaným ve směru útku a druhým ve směru osnovy, tento typ laminátu vykazuje vlastnosti jednoho typu vlákna v jednom směru a druhého ve druhém směru. Častěji se ovšem můžeme



setkat s tkaninami, ve kterých se střídají nitě každého vlákna v obou směrech. Mezi nejčastější kombinace vláken patří uhlík/aramid, aramid/sklo a uhlík/sklo, viz obrázek 2.11 [1], [17].



**Obrázek 2.11** Hybridní tkaniny, zleva: uhlík/aramid, aramid/sklo, uhlík/sklo [18], [19], [20]

Hybridní tkanina tvořená uhlíkovými a aramidovými vlákny má vysokou pevnost v tahu. Uhlíková vlákna přispívají svou tuhostí a aramidová dodávají výslednému materiálu rázovou houževnatost. Typická křehkost uhlíkových vláken je vyrovnávána přirozenou houževnatostí aramidu. Obě vlákna mají nízkou hustotu a jsou relativně drahá. Uhlíkovo-aramidové hybridní tkaniny se používají nejen v leteckém průmyslu, ale také v námořním a dopravním průmyslu.

Tkanina tvořená aramidovými a skleněnými vlákny má lepší odolnost proti delaminaci. Aramidová vlákna dodávají tkanině houževnatost a skleněná vlákna přispívají svou dobrou pevností v tlaku a tahu.

Uhlíková vlákna v kombinaci se skleněnými tvoří vysoce pevný a tuhý materiál s poněkud lepší odolností proti rázu za rozumnou cenu [17], [21].

Tvoření hybridních tkanin zvyšováním obsahu uhlíku ve vybraných oblastech přispívá ke zvýšení pevnosti a tuhosti. Kdežto přidání aramidových, příp. skleněných vláken mezi uhlíkové způsobuje místní měknutí. Kombinace a poměr vláken tvoří významnou roli při optimalizaci celkových vlastností konečného kompozitu [1].

## 2.4 Prepregy

Prepregy jsou polotovarem kompozitních materiálů, ve kterém jsou vyztužující vlákna prosycena (impregnována) matricí. Uspořádání dlouhých vláken v prepregu může být jednosměrné nebo vícesměrné (tkanina). Na trhu se nachází mnoho kombinací matrice-vlákno, avšak z určitých důvodů některé kombinace nejsou dostupné, např. PEEK matrice se používá v kombinaci s jednosměrně uspořádanými vlákny, ale v kombinaci s tkaninami se nepoužívá. Oproti tomu PEI a PPS matrice jsou častěji kombinovány s tkaninami [1].

Impregnace termoplastickou matricí je složitější než reaktoplastickou, což je způsobeno vysokou viskozitou termoplastů. Zvýšením teploty lze dosáhnout snížení viskozity, ale u některých polymerů může dojít k rozkladu dříve, než dojde ke snížení viskozity. Navíc mnoho termoplastů je nerozpustných ve většině organických rozpouštědel, nebo jsou jejich vlastnosti značně degradovány při snaze je rozpouštědly naředit. Důkladná impregnace je tedy značně limitována. Mezi některé metody impregnace termoplastickou matricí patří:

**Solvent Impregnation**, nebo-li impregnace za pomoci rozpouštědla. Některé polymery jsou snadno rozpustné ve vybraných organických rozpouštědlech, což umožňuje poměrně výhodnou impregnaci. Tato metoda se používá pro impregnaci tkanin matricí z PEI. Celý proces



spočívá v rozpuštění pryskyřice v lázni rozpouštědla a ponoření vyztužující tkaniny do roztoku pryskyřice. S použitím sušící pece se rozpouštědlo odpaří z prepregu [1], [22].

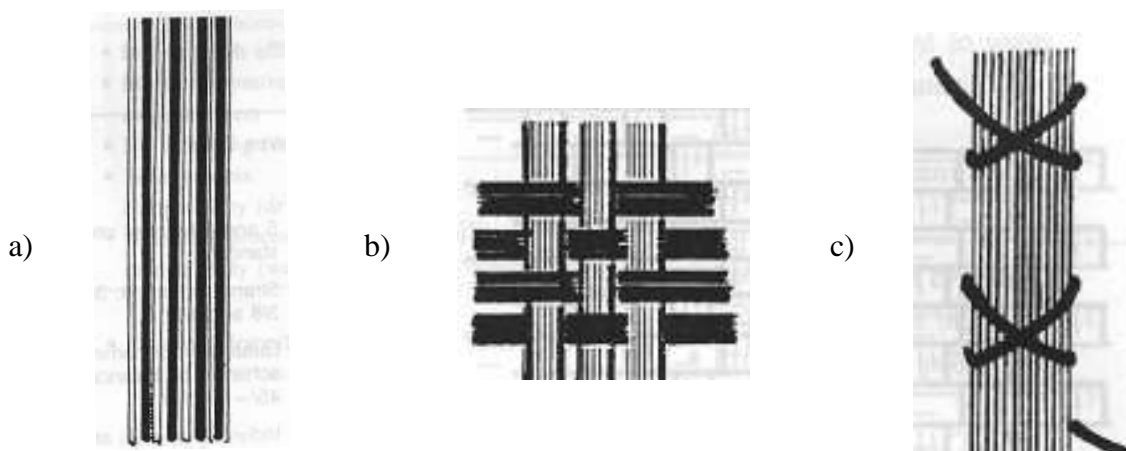
**Hot Melt Process** – tato metoda se skládá ze dvou etap. V první etapě se nanáší tenká vrstva zahřáté pryskyřice na papírový substrát. Ve druhé etapě při působení tlaku a tepla dochází k natlačení tenké vrstvy pryskyřice do tkaniny [1], [22].

**Prášková metoda** se využívá při výrobě termoplastických prepregů s dlouhými vlákny. Podstata metody spočívá v přichycování jemného polymerního prášku elektrostatickými silami na výztuž. Polymer se následně roztaví k vytvoření prepregu. Někdy může být materiál prodáván před samotným natavením, ke kterému dochází až při konečné operaci, tj. lisování součásti. Mechanická výroba prášků s velmi jemnými částicemi představuje dodatečné náklady, které mohou být větší než samotné zanešení polymeru do vláken. Avšak čisté náklady na kombinování polymeru s vlákny mohou být nižší než při impregnaci pomocí rozpouštědla [6].

**Prokládání vyztužujících vláken termoplastovými** – tato metoda spočívá v natažení pryskyřice ve formě vláken mezi vlákna vyztužující. Pryskyřičná vlákna jsou následně roztavena. Samotná výroba pryskyřičných vláken představuje dodatečné náklady, které však v celkových výdajích můžou být poměrně malé.

Tímto procesem vznikají tzv. **hybridní tkaniny s termoplastovými vlákny**, které se dělí na následující typy (viz obrázek 2.12):

- Ze směsové příze obsahující vlákna matriční i výztužná – tento typ dosahuje nejlepších mechanických vlastností, dobrého smáčení, ale má vyšší cenu
- Tkanina obsahuje samostatná vlákna termoplastová a výztužná – nejčastější případ
- Výztužné vlákno je obaleno matričním termoplastovým vláknem [8]



**Obrázek 2.12** Hybridní tkaniny s termoplastovými vlákny a) ze směsové příze b) tkanina c) výztuž obalená vláknem [8]

Prepregy tedy můžou být buď úplně impregnované polymerizovanou maticí, nebo jen důkladně fyzikálně smíšený (pomocí impregnačního prášku, nebo smícháním vyztužujících vláken s matričními) – u tohoto případu musí být impregnace natavením provedena v pozdějším stádiu buď v konsolidaci, anebo jako součást finálního tvarování součásti.

Výhody použití prepregů spočívají v usnadnění výroby součásti, nižších nákladech na zpracování, řízení tloušťky laminátu je snadnější a objem vláken je stabilní. Prepregy mají dobrou odolnost proti únavě, životnímu prostředí a korozi. Termoplastické prepregy jsou oproti reaktoplastickým v plně zpolymerizovaném stavu a jejich životnost je při pokojové teplotě teoreticky neomezená [1].

Vlastnosti vybraných prepregů jsou uvedeny v tabulkách 2.7 a 2.8 na další straně.

**Tabulka 2.7** *Mechanické vlastnosti prepregů s jednosměrným uspořádáním vláken [23], [24]*

	Pevnost v tahu [MPa]	Modul v tahu [GPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul v tlaku [GPa]
PEI/ uhlík IM	2000	131	1100	117
PEEK/uhlík IM	2900	172	1310	152
PEKK/uhlík IM	2460	139	1490	127
PPS/uhlík IM	2760	152	1280	124

Hodnoty platí pro pokojovou teplotu (23 °C) a směr 0°

**Tabulka 2.8** *Mechanické vlastnosti tkanin se saténovou vazbou [24]*

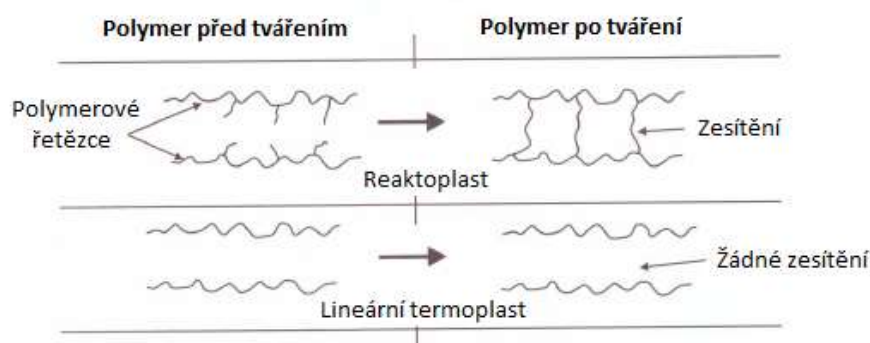
	Pevnost v tahu [MPa]	Modul v tahu [GPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul v tlaku [GPa]
PEI / E-sklo	515	25	612	29
PPS/ E-sklo	279	20	297	22

Hodnoty platí pro pokojovou teplotu (23 °C) a směr 0°

### 3 TECHNOLOGIE VÝROBY

Výrobní technologie přímo závisí na druhu matrice zpracovávaného kompozitního materiálu. Proto je v první řadě vhodné posoudit, jaký dopad má matrice na vlastnosti kompozitu, zpracovatelnost a na náklady spojené s výrobou [1].

Jak již bylo zmíněno termoplasty společně s reaktoplasty patří do skupiny polymerních matric, a tudíž jsou si i hlavními konkurenty. Reaktoplasty během tváření tvoří husté příčné zesílení, čímž dochází k jejímu vytvrzení. Tento proces je nevratný, a tudíž již vytvrzený reaktoplast nemůže být znovu roztaven. Oproti tomu termoplasty během tváření zesílení netvoří, viz obrázek 3.1. Molekuly jsou vázány pouze slabými vazbami, díky čemuž mohou být opětovně nataveny a tvarovány [25].



**Obrázek 3.1** Struktura termoplastů a reaktoplastů [25]

Strukturální rozdíl mezi reaktoplasty a termoplasty přináší potencionální výhody ve zpracování termoplastů. Mezi mnohé vlivy působící na chod výroby patří viskozita matrice, výrobní parametry (teplota, tlak, čas) a případné neblahé vlivy vůči lidskému zdraví.

Termoplasty mají velmi vysokou viskozitu, což činí impregnaci velmi obtížnou. K dosažení stejného toku materiálu jako u reaktoplastů je zapotřebí vyšších tlaků. Zatímco u některých reaktoplastů dochází k vytvrzení při pokojové teplotě, ostatní reaktoplasty a termoplasty vyžadují vysoké procesní teploty, jež musí být důsledně kontrolovány pro dosažení požadovaných vlastností. Výroba termoplastů je méně časově náročná než výroba reaktoplastů. Je to způsobeno tím, že reaktoplasty je nutno nechat zcela vytvrdit, což může trvat i několik dní, kdežto termoplasty stačí natavit, vytvarovat a zchladit k dosažení dimenzionální stability. Chemická reakce, která probíhá během vytvrzovacího procesu reaktoplastů, je doprovázena vznikem těkavých a potencionálně toxických látek. Na rozdíl molekulární struktura polymerizovaného termoplastu je chemicky netečná a zdraví neškodná. Pokud se zaměříme na celkové náklady spojené s výrobou, ve většině případů vychází reaktoplasty výhodněji. [1]

Nejčastěji využívanými výchozími surovinami výrobních procesů jsou prepregy. V diskontinuální výrobě může být celý proces výroby rozdělen do tří základních fází: kladení prepregů, konsolidace a formování. V prvním kroku je naskládáno několik vrstev prepregů na sebe tak, aby při následné konsolidaci byla vymezena požadovaná výška. Ve druhém kroku dochází ke konsolidaci, tedy ke spojení jednotlivých vrstev prepregů v monolitický laminát, a ve třetím kroku je laminát vytvarován do požadovaného tvaru. V některých případech mohou být dva, či dokonce tři kroky spojeny v jednu operaci. Avšak častěji jsou jednotlivé kroky prováděny zvlášť. V kontinuální výrobě se často kladení prepregů stává nedílnou součástí konsolidace, a v některých případech i součástí formování, což je umožněno místním působením tlaku a tepla. Jednotlivé kroky budou detailněji vysvětleny v následujících kapitolách [25].

Spojování dílů s termoplastovou maticí se provádí působením tepla – svařováním, kde oproti reaktoplastům mizí problém s úpravou povrchů a výběrem vhodného lepidla [26].

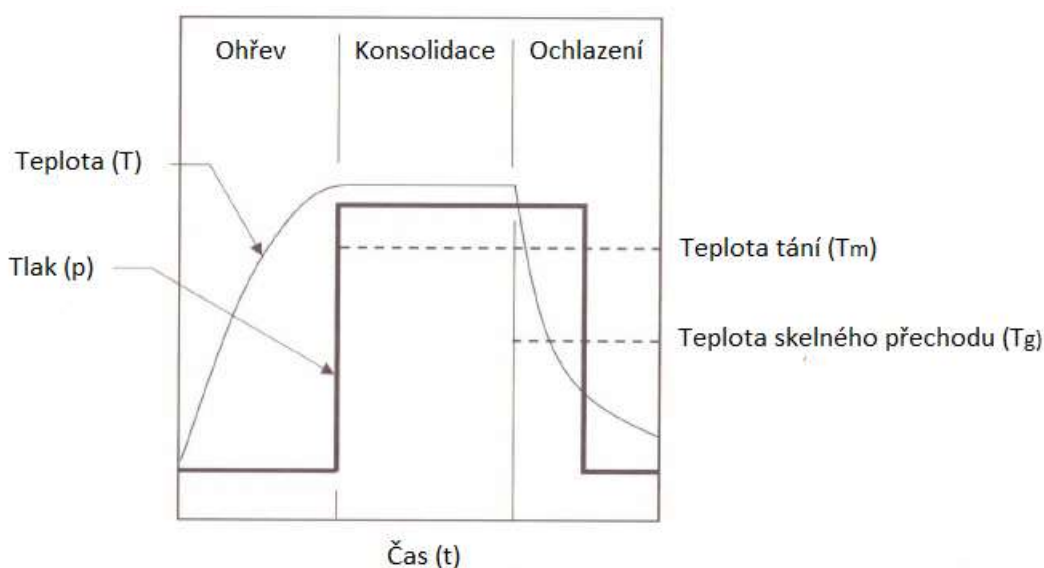
### 3.1 Kladení prepregů

Jak již bylo zmíněno, kladení prepregů slouží k vymezení požadované výšky kompozitu. Nejčastěji využívanou metodou je ruční kladení prepregů do otevřené formy. V mnoha případech je tento proces vybaven automatizovaným stříháním prepregů.

Termoplastové prepregy postrádají lepivost, proto k jejich uchycení musí být místně nataveny okraje za použití páječky nebo horkovzdušné pistole. Prepregy, jež byly vyrobeny metodami Solvent Impregnation a Hot Melt Process, postrádají tvarovatelnost a pro přizpůsobení formě bývají také lokálně zahřáty. Takto připravené prepregy jsou připraveny ke konsolidaci [25].

### 3.2 Konsolidace termoplastů

Konsolidace termoplastů se skládá z ohřevu, samotné konsolidace a následného zchlazení. Celý proces je schematicky zobrazen na obrázku 3.2 [25].



**Obrázek 3.2** Schematické zobrazení procesu konsolidace termoplastů [25]

Ohřevu materiálu může být dosaženo infračervenými ohřivači, konvekčními troubami, vyhřívanými lisami nebo autoklávem. Oproti reaktoplastům není zapotřebí delších časů k chemické reakci, proto je čas potřebný k dosažení konsolidační teploty přímo závislý pouze na způsobu ohřevu a množství ohřívaného materiálu.

Konsolidace termoplastů je doprovázena autohezí. Autoheze je proces způsobený difúzí, ve kterém dochází k pohybu polymerních řetězců mezi jednotlivými vrstvami a k jejich propletení, viz obrázek 3.3 [25].



**Obrázek 3.3** Autoheze termoplastů [25]

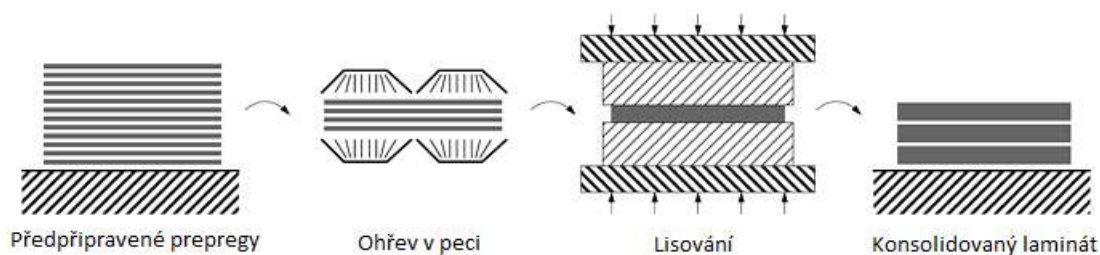
K dosažení úplné konsolidace je potřeba povrchy přiblížit na takovou vzdálenost, aby byla difúze možná. Kvůli povrchovým nerovnostem a nízkému toku materiálu musí být vrstvy deformovány působením tepla a tlaku, aby byl tak blízký kontakt umožněn. Teplota konsolidace závisí především na druhu matrice. Pro amorfnní termoplasty se teplota konsolidace pohybuje 200 °C nad teplotou skelného přechodu  $T_g$ , a pro semikrystalické by měla být maximálně 100 °C nad teplotou tání  $T_m$ . Obecně při působení vyšších tlaků a teplot dochází k rychlejší konsolidaci. Nicméně, pokud by došlo k ohřevu nad teplotu 420 °C, u většiny termoplastů by byla zapříčiněna degradace mechanických vlastností, což je nežádoucí. Čím déle jsou vrstvy v kontaktu, tím hustější propletení řetězců vzniká a ve výsledku tvoří pevnější spojení vrstev.

Doba konsolidace závisí stejně jako teplota na typu matrice a její viskozitě. Amorfnní termoplasty si zachovávají poměrně vysokou viskozitu i při zvýšených teplotách, proto je k jejich úplné konsolidaci zapotřebí delších časů než u semikrystalických termoplastů. Tato doba může být zkrácena zvýšením konsolidačního tlaku. Samotné chlazení materiálu po konsolidaci závisí na použité metodě a množství materiálu. Avšak platí, že pro zachování semikrystalické struktury termoplastů, by stupeň chlazení neměl být příliš rychlý. Přítlak, který byl vyvozen pro dosažení blízkého kontaktu mezi vrstvami, musí být udržován tak dlouho, dokud teplota materiálu neklesne pod teplotu skelného přechodu matrice. Ve většině případů to není autoheze, co omezuje rychlost zpracování, ale čas potřebný k zahřátí a ochlazení materiálu [1], [25].

I přestože je mnoho způsobu konsolidace prepregů na laminát, pouze málo z nich je ekonomicky výhodných. Mezi některé z nich patří lisování mezi deskami, lisování mezi pásy a konsolidace v autoklávu. Další variantou výroby je kladení „in-situ“, kdy je kladení a konsolidace prováděno v jedné operaci [26]. Zmíněné operace budou následně popsány detailněji.

### 3.2.1 Lisování mezi deskami

U výrobního procesu lisováním mezi deskami jsou předem ručně kladené vrstvy prepregů nejdříve ohřáty v peci a následně okamžitě přemístěny do tlakové zóny, která je realizována hydraulickým lisem. U této metody se můžeme setkat s dvěma způsoby lisování, a to lisování za tepla a za studena. Lisování za tepla je voleno v případech, kdy je potřeba podpořit proudění natavené matrice k dosažení úplné konsolidace, a v případech, kdy je potřeba kontrolovat tvorbu krystalické struktury. Kdežto lisování za studena se využívá u zcela impregnovaných prepregů, které mohou být rychle ochlazeny. Konsolidace při lisování za studena může trvat méně než minutu, pokud je matrice při opuštění pece zcela natavena. Konečným výrobkem je monolitní kompozitní deska s předepsanou skladbou vrstev. Na obrázku 3.4 je schematicky vyobrazen celý proces výroby touto metodou [1], [25].

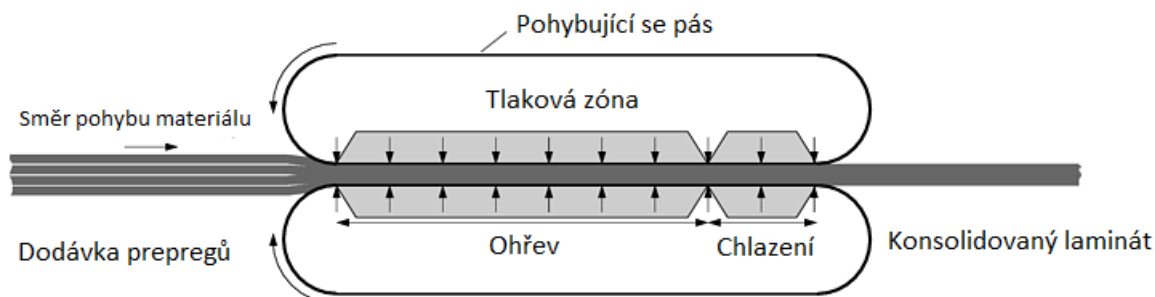


**Obrázek 3.4** Proces výroby lisováním mezi deskami [1]

### 3.2.2 Lisování mezi pásy

Lisování mezi pásy nabízí nejefektivnější způsob kontinuální konsolidace prepregů v rovinné lamináty. Lisovací zařízení je tvořeno dvěma pásy, které jsou uloženy nad sebou. Jejich rotací dochází k posunu prepregů. Lisování mezi pásy je rozděleno na dvě zóny, viz obrázek 3.5 na další straně. Ve vstupní zóně dochází k ohřevu prepregů a natavení matrice. Ve druhé zóně

dochází k chlazení. V obou zónách je materiál vystaven působení přítlaku. Tento způsob výroby je široce využíván při výrobě laminátových rohoží se skleněnými vlákny a polypropylenovou matricí v automobilovém průmyslu [25].



**Obrázek 3.5** Lisování mezi pásy [1]

### 3.2.3 Konsolidace v autoklávu

U součástí se složitou geometrií se využívá částečné konsolidace v autoklávu<sup>8</sup>. Procesní parametry vysoce výkonných termoplastů se pohybují kolem 350–400 °C a 680–1400 kPa. Nalezení autoklávu, který by dokázal odolat takto vysokým teplotám a tlakům může být poměrně obtížné, a tudíž i velice drahé.

Proces konsolidace v autoklávu spočívá v pokládání prepregů do formy, kteréžto může být realizováno manuálně nebo pomocí automatizovaného pokládacího přístroje. Forma, do které jsou pokládány prepregy, by měla mít stejný koeficient tepelné roztažnosti jako prepreg. Pro termoplasty s uhlíkovou výztuží se používá forma z grafitu, lité keramiky nebo Invaru 42<sup>9</sup>. Položené prepregy jsou následně vakuově zabalený. Tento balící materiál (membrána) musí být schopen odolat vysokým teplotám a tlakům. Prepregy jsou v autoklávu zpevněny a konsolidovány během několika hodin.

Typické podmínky pro konsolidaci prepregu s PEEK matricí vyztuženou uhlíkovými vlákny jsou v rozmezí teplot 360–400 °C a tlaků 350–700 kPa. Samotný proces konsolidace trvá 5–30 minut. Nicméně celkový čas potřebný pro zahřátí a zchlazení nástroje se pohybuje kolem 5–15 hodin.

Proces konsolidace v autoklávu je poměrně finančně nákladný, avšak nachází své uplatnění u součástí, které není možné vyrobit jinými metodami [25].

### 3.2.4 Kladení „in-situ“

Kladení „in-situ“ (autokonsolidace) je série procesů, mezi které patří pokládání zahřáté pásky termoplastu a vláken. Pokládání pásky je zajištěno kladečím strojem, jehož hlava pokládá zahřátý pásek prepregu při udržení potřebného přítlaku až do doby ochlazení (obrázek 3.6). Během výroby dochází k ohřevu pouze aktuálně zpracovávané oblasti nad teplotu tání, která je neprodleně konsolidována. Zbývající části polotovaru jsou v daný okamžik udržovány pod teplotou tání.

V dalším procesu je páska prepregu pokládána pomocí přítlačného válce (obrázek 3.7). V místě dotyku dochází k natavení předkonsolidované pásky pomocí laseru. Ohřev může být realizován i jinými způsoby, např. infračervenými zářiči.

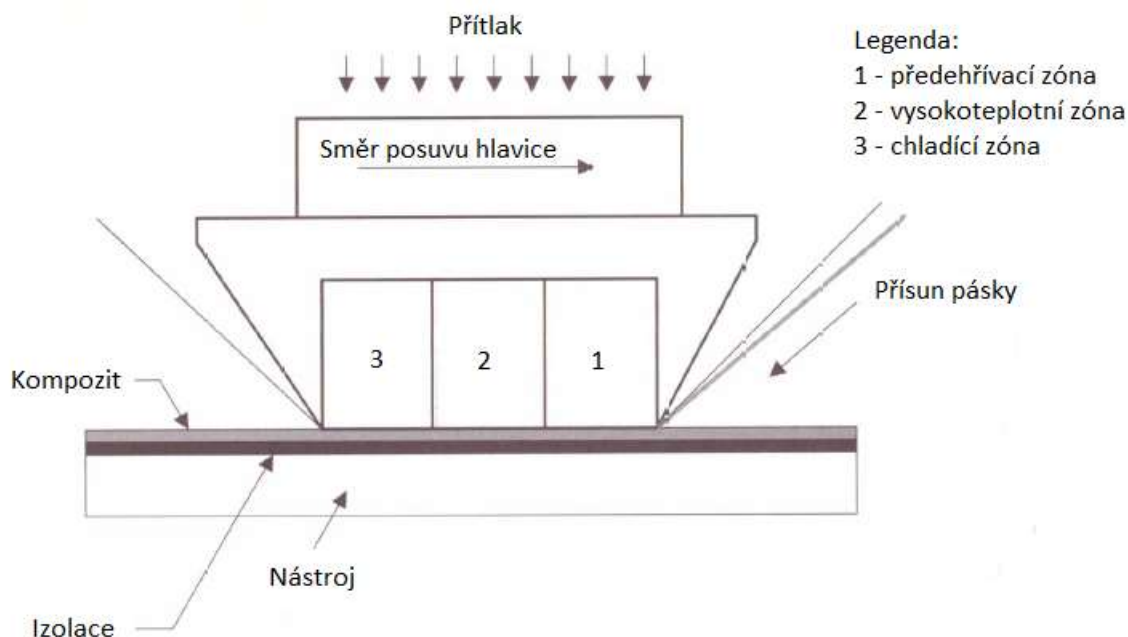
Vyvinutím přítlaku při pokládání prepregu za zvýšené teploty je autokonsolidace velmi rychlá. Avšak kvůli krátkému působení v jednotlivých místech nemusí být úplná.

<sup>8</sup> Autokláv (z angl. autoclave) - přístroj konstruovaný pro procesy probíhající při vysokých teplotách a tlacích

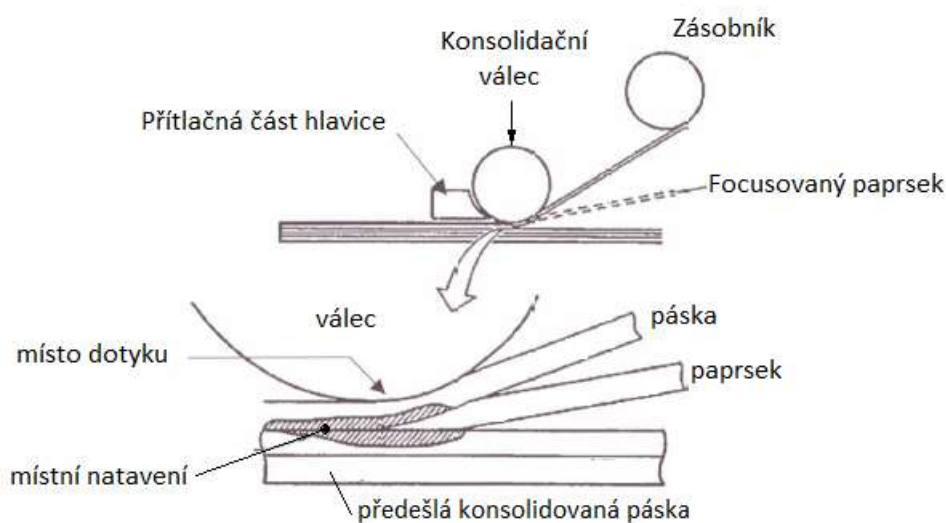
<sup>9</sup> Invar 42 – slitina železa a niklu v poměru 42 % niklu a 58 % železa



Prepregy, které mohou být konsolidovány „in-situ“, představují konkurenceschopnou alternativu reaktoplastickým kompozitům. Výrobní časy a pořizovací ceny zmiňovaných prepregů jsou srovnatelné s reaktoplastickými materiály [25], [26].



**Obrázek 3.6** Pokládání horké pásy pomocí hlavy [25]



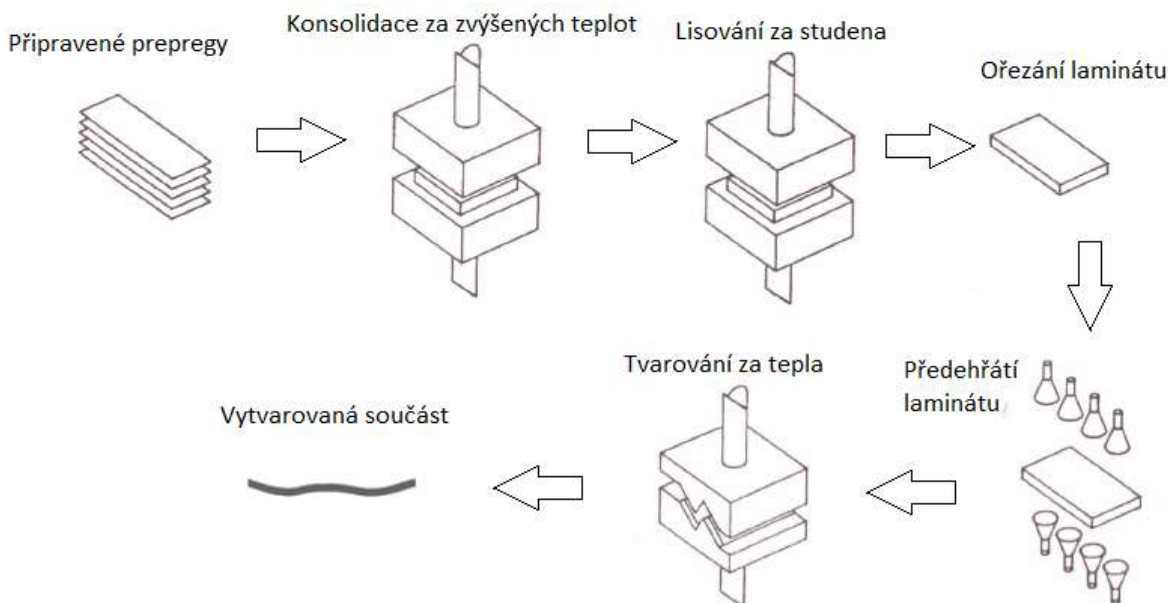
**Obrázek 3.7** Pokládání horké pásy pomocí přítlačného válce [25]

### 3.3 Termoforming

Termoforming je jeden z nejrychlejších způsobů výroby tvarových součástí. Technologie výroby spočívá ve využití tepla a tlaku k formování součástí. Jeho aplikace je umožněna výhodnou povahou termoplastické matrice, která nepodléhá chemické reakci za účelem vytvrzení jako matrice reaktoplastická. I přestože během procesu nedochází k chemické změně, musí být procesní parametry optimalizovány a kontrolovány. Především při ochlazování může dojít u semikrystalických termoplastů k ovlivnění konečné struktury. Semikrystalická struktura je charakterizována podílem krystalinity, který závisí na rychlosti chlazení. V případě že by chlazení

bylo příliš rychlé, nemuselo by dojít vůbec k vytvoření krystalické struktury. Dalším důvodem kontroly parametrů výroby je eliminace porozity a jiných vad struktury.

Technologie termoformingu zahrnuje několik různých metod výroby. Typický proces termoformingu s konsolidací je schematicky znázorněn na obrázku 3.8 [25].



**Obrázek 3.8** Typický proces termoformingu [25]

Postup výroby součásti může být rozdělen do následujících kroků:

1. Shromáždění a pokládání prepregů podle předlohy. Množství prepregů je dáno výškou požadovaného laminátu.
2. Konsolidace v monolitní laminát v lisovacím zařízení při teplotě tání a při vyvinutí procesního tlaku, který je potřebný pro dostatečný tok natavené matrice. Lisování za tepla se pohybuje v řádu minut až hodin podle typu matrice.
3. Pro dokončení konsolidace je nutné laminát ochladit, a tak dosáhnout strukturální stability. K chlazení je použito další lisovací zařízení, v tomto případě dochází k lisování za studena.
4. Ořezání laminátu do požadovaného tvaru.
5. Ohřev laminátu nad teplotu tání.
6. Následně je ohřátý laminát formován v lisu. Tvar lisovnic je dán požadovaným tvarem součásti. Součást je vystavena přitlaku, dokud teplota součásti neklesne pod teplotu skelného přechodu  $T_g$ , čímž se eliminují zbytková napětí [25].

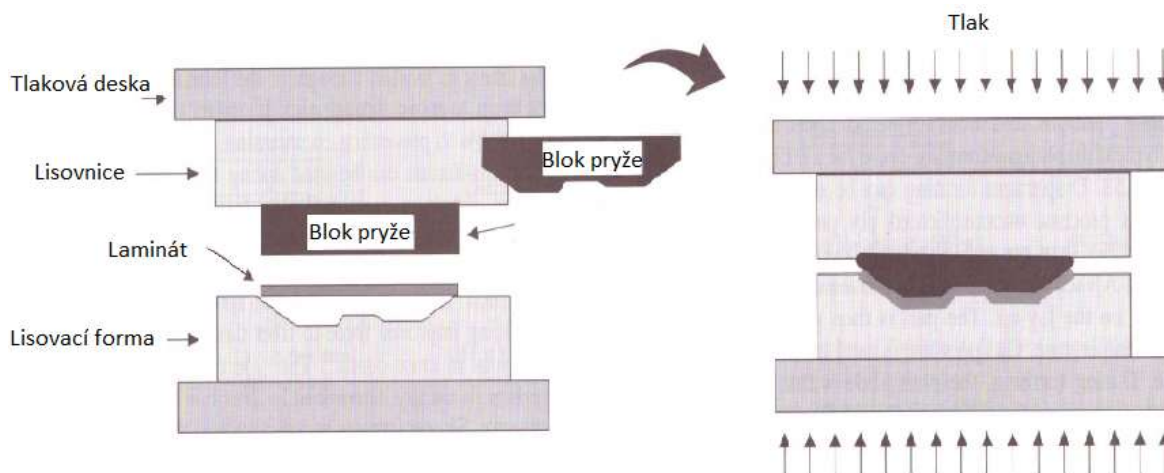
Výchozím materiálem pro termoforming je předkonsolidovaný prepreg. V některých případech je konsolidace spojena s procesem tvarování součástí.

Ohřev materiálu může být vykonán různými způsoby. Mezi nejčastěji používané metody patří ohřev infračervenými zářiči, ohřev v konvekčních pecích a lisech s vyhříváními lisovnicemi. Zvolení metody ohřevu závisí především na tvaru a výšce polotvaru. Pokud pracujeme s tenkými předkonsolidovanými lamináty je dobrou volbou ohřev infračervenými zářiči. Kdežto pro široké a tvarově složité výrobky je vhodnější ohřev v konvekčních pecích.

Přemístění ohřátých plátů k tvarovacím strojům musí být provedeno v co nejkratších časových intervalech tak, aby nedošlo k poklesu teploty pod teplotu skelného přechodu u amorfních termoplastů a pod teplotu tání u semikrystalických termoplastů. Doba přemístění se pohybuje v řádu sekund.



Pro tvarování součásti se používají lisy, jež mohou být vybaveny vnitřním ohříváním/chlazením lisovnic. V nejčastějších případech je jedna lisovnice tvořena tepelně odolným silikonem, který působí na laminát rovnoměrně při jeho stlačení. Blok silikonu může být vyroben ve tvaru součásti, a tím přispívat ještě k rovnoměrnějšímu šíření tlaku a detailnějšímu vytvarování, viz obrázek 3.9. Během formování je dosahováno tlaků v rozmezí od 690 kPa do 3500 kPa.



**Obrázek 3.9** Proces termoformingu při využití lisovnice z pryže [25]

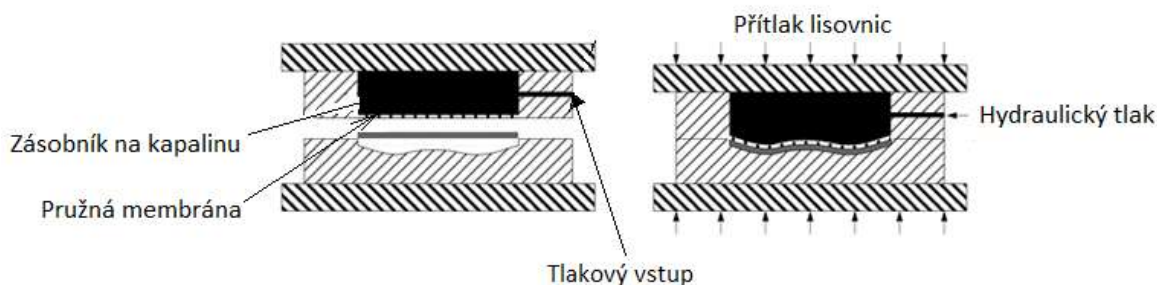
V nejlepším případě je matrice při tvarování zcela zkapalněna. Kdežto vyztužující vlákna si zachovávají svou pevnost a při vystavení kompresi dochází k jejich prohýbání a zvrásňování. Z toho důvodu musí být lisovnice upravena tak, aby držela vlákna neustálé napjatá, ale zároveň umožňovala i případný posun při formování. Pokud by tento pohyb lisovnice neumožňovala, může být využito speciálních držáků.

Procesní tlak a rychlost formování jsou dalšími faktory, které ovlivňují kvalitu výrobku. Snížením rychlosti a tlaku formování se potlačí nadměrné zvrásnění vláken a nechtěná degradace mechanických vlastností.

Způsobů, jak zahřátý materiál tvarovat, je mnoho. Nicméně některé metody nejsou pro tvarování termoplastů vhodné. Vysoké procesní teploty a viskozita termoplastů značně ovlivňují úspěšnost výrobního procesu. Vybrané metody termoformingu jsou popsány níže detailněji [1], [25].

### 3.3.1 Hydroforming

Hydroforming využívá jako tvářecí médium kapalinu. Zásobník s kapalinou je typicky uložen v horní části lisy, viz obrázek 3.10. Spodní část zásobníku je přehrazena membránou, která je schopná se při působení tlaku přizpůsobit tvaru formy, a tak danou součást vytvarovat. Hydroforming umožňuje tvarovat součásti za vyšších tlaků (až 0,69 MPa). Tato technologie představuje poměrně výhodný způsob výroby, díky nižším nákladům na nástroje. [1] [25]



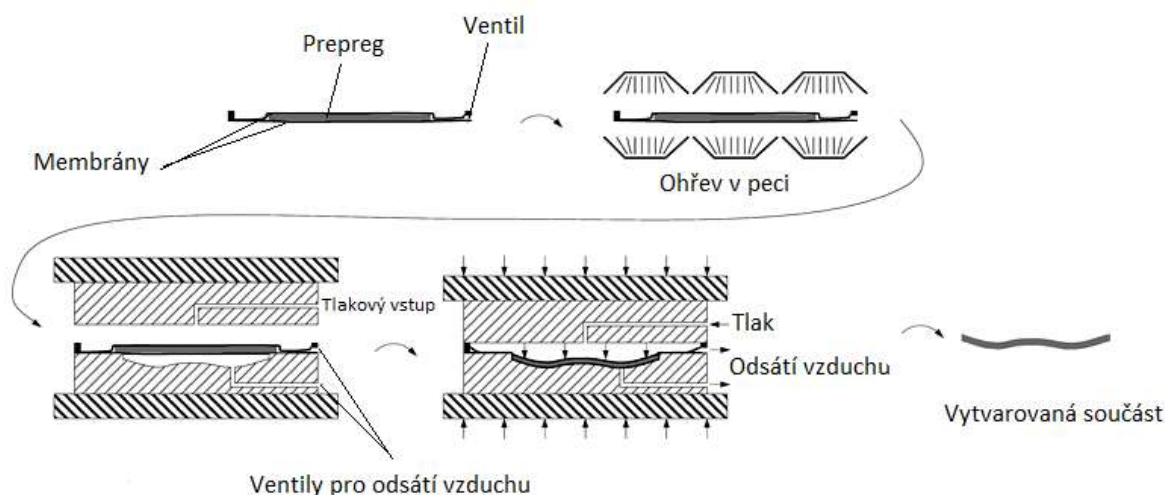
**Obrázek 3.10** Proces tvarování metodou Hydroforming [1]

### 3.3.2 Tváření membránou

Tváření membránou představuje poněkud specifickou metodu, jejíž předností je schopnost formovat i velmi složité tvary a zachovat vysoké rozlišení kontur. Pro formování pomocí membrány je vstupní materiál volen především v závislosti na schopnosti dobrého skluzu. Tato schopnost je výrazně lepší u nekonsolidovaných desek, proto jsou pro tvarování voleny přednostně. Metoda tváření membránou může být realizována v lisu nebo v autoklávu [1], [25].

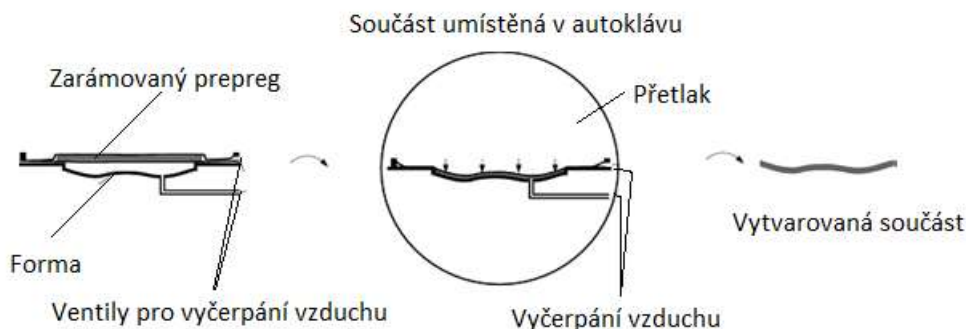
U obou metod je syrový materiál nejdříve umístěn mezi dvě pružné membrány, které se upínají kolem celého pracovního prostoru pomocí rámu. Následně je z mezimembránového prostoru odčerpán vzduch za účelem poskytnutí pnutí mezi vrstvami.

Při formování v lisu je zarámovaný materiál umístěn mezi lisovnice, které jsou vybaveny ohřevem. Pokud lis není vybaven ohřevem, může být materiál předehřát zvlášť v peci (viz obrázek 3.11). Při ohřátí nad teplotu tavení matrice je vzduch vháněn do uzavřeného prostoru mezi horní lisovnicí a membránou. Pro zvýšení efektivity může být vzduch odsáván z prostoru pod membránou. Pomocí tlaku je natavený materiál tlačěn do formy, přičemž dochází k vytvarování. Typické výrobní tlaky se pohybují v rozmezí 350–1040 kPa. Zchlazením nástroje je dosaženo konsolidace vytvarované součásti.



**Obrázek 3.11** Tváření membránou při použití lisu [1]

Při využití metody formování v autoklávu je zarámovaný materiál připevněn na tenké formě, viz obrázek 3.12. Mezi membránami se vyčerpá vzduch a pomocí zahřáté atmosféry dojde k natavení matrice. Do autoklávu je seshora přiváděn natlakovaný vzduch a z prostoru mezi membránou a formou je vzduch odčerpáván, čímž dochází k přiléhání materiálu do formy. Po dokončení formování je atmosféra v autoklávu ochlazená za účelem zpevnění. Metodou formování v autoklávu lze vyrábět komplexnější součásti.



**Obrázek 3.12** Tváření membránou v autoklávu [1]

Membránové uzavření materiálu umožňuje skluz jednotlivých vrstev, a tím redukuje zvrásňování vláken. Mezi nejčastější membránové materiály patří SUPRAL<sup>10</sup> a vysokoteplotní polyimidové filmy. SUPRAL je méně náchylný k protrhnutí, proto je používán pro mohutnější součásti a složitější geometrie, kdežto polyimidové filmy jsou vhodné pouze pro tenké součásti. Typické teploty zpracování činí 400 °C pro SUPRAL a 300–400 °C pro polyimidové filmy. Hlavní nevýhodou membránových materiálů je jejich jednorázovost použití, což výrobu značně prodražuje [25].

Pomocí metody tváření membránou lze vyrábět součásti velmi rychle, samotné formování trvá několik sekund a celkový výrobní čas se pohybuje v rámci 20–100 minut. V případě formování masivních součástí může celý proces trvat několik hodin [25].

---

<sup>10</sup> SUPRAL – superplasticky tvarovaná slitina hliníku se schopností se natáhnout na několiknásobek původní délky při zahřátí



## 4 PRAKTICKÉ APLIKACE

Snižování hmotnosti a zvyšování energetické účinnosti letounů představuje hlavní důvody náhrady kovových dílů kompozitními. Termoplastové kompozitní díly jsou až o 50 % lehčí než díly z hliníku. V závislosti na druhu dosahují podobné pevnosti a mají vyšší odolnost proti korozi [27].

Díky nízké absorpci vlhkosti si termoplasty zachovávají vynikající dielektrické vlastnosti během provozu. Tato vlastnost se uplatňuje především na konstrukci aerodynamického krytu radaru. Na konstrukci krytu radaru letadla Air Force RC-135 byl využit tkaninový termoplast (PEKK) vyztužený křemennými vlákny, viz obrázek 4.1 [1].



*Obrázek 4.1 Kryt radaru na letadle RC-135 [1]*

### Vrtulník AW169

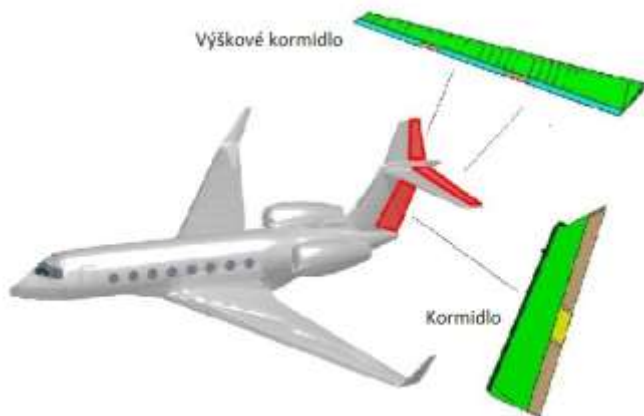
Vodorovné ocasní plochy vrtulníku jsou vyrobeny z termoplastu (PPS) vyztuženého uhlíkovými vlákny, viz obrázek 4.2. Tři metry dlouhé tělo ocasní plochy tvoří čtyři předem vytvarované panely, které jsou spojeny za působení tlaku a tepla. Rázová houževnatost termoplastu je cenná obzvláště na přední hraně. Celkově je termoplastová konstrukce ocasní plochy o 15 % lehčí než ekvivalentní kovová konstrukce [28].



*Obrázek 4.2 Hotová vodorovná ocasní plocha s přidělanými reaktoplastickými křídélky (červené) [29]*

## Gulfstream G650

Směrové a výškové kormidlo letounu je tvořeno částmi, které jsou indukčně svařeny dohromady. Konstrukce je vyrobena z termoplastu (PPS) vyztuženého uhlíkovými vlákny. Pro dosažení nejvyšší úrovně kvality jsou tyto části vystaveny dodatečnému cyklu v autoklávu [28].



*Obrázek 4.3 Gulfstream G650 [30]*



*Obrázek 4.4 Kormidlo letounu G650 [31]*

## Quest Kodiak

Robustní víceúčelové letadlo, které může přepravovat náklad i cestující nebo sloužit jako letecká ambulance. Kodiak pravidelně vyjíždí, letá a přistává v náročných podmínkách. Stejně jako ostatní obojživelné letouny je Kodiak vybaven přistávacími plováky, viz obrázek 4.5. Tyto plováky mají krycí poklopy, které umožňují posádce zkontrolovat vodotěsnost plováků. Původně hliníkové kryty byly nahrazeny polypropylenovými kryty vyztuženými uhlíkovými vlákny (obrázek 4.6). Náhradou došlo jak ke snížení hmotnosti letounu, tak ke zvýšení odolnosti a trvanlivosti samotných krytů [32], [33].



*Obrázek 4.5 Quest Kodiak [32]*



*Obrázek 4.6 Kryt plováku [33]*



## AIRBUS

Již více než 30 let společnost Airbus propaguje používání kompozitních materiálů ve svých letadlech, od vertikálního stabilizátoru letounu A310 až po A350 XWB – na kterém je více než polovina konstrukce vyrobena z kompozitních materiálů. Velká část křídla A350 XWB je složena z lehkých karbonových kompozitů, včetně jejich horních a spodních krytů. Délkou 32 metrů a šířkou 6 metrů se řadí mezi největší části vyrobené z uhlíkových vláken [34].

A350 XWB má trup tvořen pěti hlavními částmi, které jsou spojeny čtyřmi panely. Každý panel je podepřen systémem vnitřních rámu a nosníků. Nosníky jsou přímo nalepeny na panely, ale rámy jsou k panelům připevněny pomocí svorek. Tyto svorky mohou mít různé tvary, od jednoduchého L tvaru až po více komplexní, viz obrázek 4.7. Rozměry svorek se pohybují mezi délkou 100–800 mm a šířkou 30–400 mm. Svorky mohou být vyrobeny s PPS nebo PEEK maticí vyztuženou uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny [35].

Na spojení panelů u letadla A350 XWB je potřeba přibližně 8000 svorek. Na obrázku 4.8 je vyobrazeno umístění svorek na konstrukci trupu letadla [36].

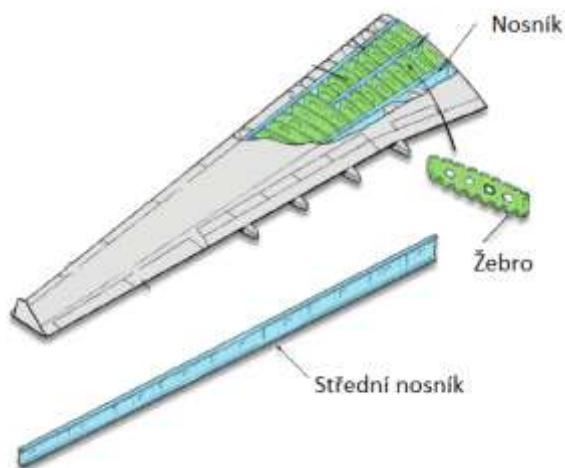


*Obrázek 4.7 Tvary svorek [35]*



*Obrázek 4.8 Montáž svorek na trupu A350 XWB [37]*

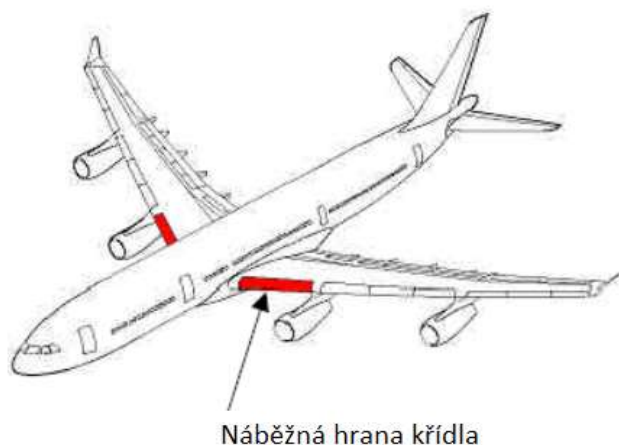
Další poměrně početné zastoupení termoplastických kompozitních materiálu je v konstrukci křídla letadla (obrázek 4.9). Pro docílení vyšší úspory hmotnosti jsou u letadel typu A330, A350 XWB a A380 kovová a reaktoplastická žebra nahrazována termoplastickými, viz obrázek 4.10. Náběžná hrana křídla letadel A340-500/600 je také vyrobena z termoplastu, viz obrázek 4.11 a 4.12 [36], [38].



**Obrázek 4.9** Konstrukce křídla [39]



**Obrázek 4.10** Termoplastické žebro [40]



**Obrázek 4.11** Náběžná hrana křídla [8]



**Obrázek 4.12** Montáž náběžné hrany [1]

## Termoplasty v interiéru letadel

Interiéry letadel představují významný segment aplikací kompozitních materiálů. Na součásti jsou kladeny požadavky dostatečné tuhosti a pevnosti při nízké hmotnosti, rozměrové stálosti, chemické odolnosti vůči čistícím prostředkům a odolnosti vůči hoření. Mezi typické aplikace kompozitů patří stropní panely, dveře, obložení oken a úložné prostory.

Vysokoteplotní termoplasty se schopností zpomalovat hoření jsou voleny přednostně. Vzhledem k jejich poměrně vysoké tuhosti se často používají nevyztužené jako kryty, clony oken aj. Kryt úložného prostoru v letadle Boeing 737 je na obrázku 4.13. Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny nahrazují hliníkové a titanové spojovací prvky a menší konstrukční



prvky sedadel. Při návrhu držáku opěrky na sedadle bylo dosaženo 30% úspory hmotnosti při využití termoplastu PES s uhlíkovými vlákny oproti hliníkové konstrukci (obrázek 4.14) [33]. První prototyp opěradla sedadla vyrobeného z PPS vyztuženého uhlíkovými vlákny snížil hmotnost o 20–30 % oproti původní hliníkové konstrukci. Nicméně při optimalizaci návrhu a výrobního procesu lze docílit 40–50% úspory hmotnosti. Prototyp sedadla je vyobrazen na obrázku 4.15 [41].



**Obrázek 4.13** Kryt úložného prostoru v letadle Boeing 737 [33]



**Obrázek 4.14** Držák opěrky [33]



**Obrázek 4.15** Prototyp opěradla [41]

Další využití termoplasty nacházejí jako podlahové panely. Přednostně jsou voleny termoplasty na bázi PEEK matrice vzhledem k vysokým mechanickým výkonům. Nicméně mohou být použity i jiné typy, jako je PEKK nebo PPS. Termoplastová podlaha potencionálně nabízí více než 20% snížení hmotnosti oproti hliníkové konstrukci [41].



## 5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provést rešerši termoplastických kompozitních materiálů a jejich aplikací na leteckých konstrukcích.

Termoplastické kompozitní materiály nabízejí velký rozsah mechanických vlastností, již je možno dosáhnout různorodou kombinací matrice a výztuže. Mezi dosud nejpoužívanější matrice patří PEEK, PPS, PEI a PEKK. Termoplasty obecně vykazují vynikající houževnatost, dobrou odolnost proti hoření a chemickou odolnost (vyjma PEI). Dále vykazují téměř nekonečnou životnost při pokojové teplotě. Oproti konkurenčním reaktoplastům tedy nemusí být uchovávány v mrazících boxech, čímž se snižují náklady na skladování prepregů.

Termoplasty mohou být tepelně tvarovány metodou termoformingu a později znovu nataveny a přetvořeny pro nové aplikace. Jsou svařitelné a vytvářejí vysoce odolné spoje, čímž oprošťují od nutnosti použití spojovacích prostředků, které neblaze přispívají na hmotnosti letadla. Výrobní procesy jsou obvykle velmi rychlé a často obsahují automatické pokládání vláken. Nicméně kvůli přirozeně vysoké viskozitě termoplastů je impregnace vláken náročnější a vyžaduje působení tepla a tlaku. K tomuto účelu je zapotřebí speciálních pokládacích zařízení. Ve většině případů jsou však prepregy dodávány jako předkonsolidované desky, které musí být za účelem tvarování ohřáty nad teplotu tání. Požadavky na optimální vlastnosti laminátu často vyžadují komplexní nástroje s řízením teploty. Ve výsledku mohou být investice na nástroje potřebné k výrobě termoplastů vyšší než na výrobu reaktoplastů, což značně limituje malosériovou výrobu. I přestože náklady na vysokoteplotní termoplasty mohou být v některých případech vyšší než na konkurenční reaktoplasty, náklady na hotovou součást mohou být až o 40 % nižší díky nižším nákladům na manipulaci, zpracování a montáž.

Termoplasty vykazují řadu příznivých vlastností pro použití na leteckých konstrukcích a v interiérech. Na současných leteckých konstrukcích termoplasty nahrazují dříve hliníkové a titanové rozměrově malé součásti. Typickým příkladem jsou svorky připevňující rámy k panelům trupu a žebra vyztužující křídla letadel společnosti Airbus. V interiéru nachází termoplasty široké uplatnění jako konstrukční prvky sedadel, úložné prostory, obložení oken, dveře, podlahové panely aj. Aplikace termoplastických kompozitních materiálů může přinést až 50% úsporu hmotnosti oproti konvenčním kovovým materiálům, což přispívá ke snížení spotřeby paliva, a tím i emisí. Termoplastické kompozitní materiály tedy patří mezi perspektivní materiály nejen v leteckém průmyslu, ale i v automobilovém, kosmickém a vojenském průmyslu.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *ASM handbook: Volume 21, Composites*. 10th edition. Materials Park, Ohio: ASM International, 2001. ISBN 0-87170-703-9.
- [2] GRAND, Hou. Using Thermoplastic Composites for Aerospace Applications. *Aerospace & Defense Technology* [online]. b.r. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.aerodefensetech.com/component/content/article/27952?Itemid=686>
- [3] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. publi.cz, 2016 [cit. 2018-04-28]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [4] HRUDNÁK, Miroslav. *Materiálové charakteristiky a struktura kompozitních materiálů pro malé sportovní letouny*. Praha, 2004. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Ústav materiálového inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří CEJP, CSc.
- [5] BÁBÍK, A. *Polymerní kompozity s vyššími užitnými vlastnostmi*. Brno, 2010. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce Prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D..
- [6] MACEK, K. *Strojírenské materiály* [online]. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2003 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [7] KELLY, A., ed. a Carl ZWEBEN, ed. *Comprehensive composite materials: Volume 1, Fiber Reinforcements and General Theory of Composites*. New York: Elsevier, 2000. ISBN 978-0-08-042993-9.
- [8] KLEMENT, Josef. Kompozitní materiály. In: *Slideplayer* [online]. b.r. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3099074/#>
- [9] *Kevlar® Aramid Fiber Technical Guide* [online]. DuPont, 2017 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: [http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/Kevlar\\_Technical\\_Guide.pdf](http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/Kevlar_Technical_Guide.pdf)
- [10] KRUKONIS, V. *Boron and Refractory Borides*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1977. ISBN 9783642666209.
- [11] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [12] CRIPPS, David. *Woven Fabrics* [online]. b.r. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/reinforcements/woven-fabrics/>
- [13] Weaving Styles. In: *Fibermax Composites* [online]. b.r. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: [http://www.fibermaxcomposites.com/shop/index\\_files/weavingstylesandpatterns.html](http://www.fibermaxcomposites.com/shop/index_files/weavingstylesandpatterns.html)
- [14] MOHMED, Ramadan, Azzam AHMED, Mohamed AHMED ELGALIB a Hashim ALI. Low Velocity Impact Properties of Foam Sandwich Composites: A Brief Review. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)* [online]. b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/265468604\\_Low\\_Velocity\\_Impact\\_Properties\\_of\\_Foam\\_Sandwich\\_Composites\\_A\\_Brief\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/265468604_Low_Velocity_Impact_Properties_of_Foam_Sandwich_Composites_A_Brief_Review)
- [15] *Sandwich Structures* [online]. Caterham Group, b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://altairenlighten.com/in-depth/sandwich-structures/>
- [16] Fancy a Sandwich?. *Aerospace Engineering* [online]. b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://aerospaceengineeringblog.com/sandwich-panel/>

- [17] CRIPPS, David. *Hybrid Fabrics* [online]. b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/reinforcements/hybrid-fabrics/>
- [18] *Carbon Kevlar 2/2 Twill* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.easycomposites.co.uk/#!/fabric-and-reinforcement/carbon-fibre-reinforcement/hybrid-and-decorative-carbon-fabrics/carbon-aramid-22-Twill-1-2m.html>
- [19] *Aramid fiber / E-Glass / fabric* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/gurit/product-37817-1405265.html>
- [20] *White Carbon Fiber/Fiberglass Fabric* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://carbonsales.com/White-Carbon-Fiber-Fiberglass-Fabric.html>
- [21] *Fibermax Composites* [online]. b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://www.fibermaxcomposites.com/shop/index\\_files/carbonkevlar.html](https://www.fibermaxcomposites.com/shop/index_files/carbonkevlar.html)
- [22] THOMAS, G.P. Composite Prepregs – Manufacturing, Benefits and Applications. *AZO Materials* [online]. b.r. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8353>
- [23] Selector Guide. *Cytec Solvay Group* [online]. b.r. [cit. 2018-05-05].
- [24] Datasheets. *Tencate Advanced Composites* [online]. b.r. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.tencatecomposites.com/resources/datasheets>
- [25] CAMPBELL, F. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. 1st ed. Boston: Elsevier, 2006. ISBN 978-1-85-617495-4.
- [26] Vyztužené termoplasty v letecké konstrukci. *MM* [online]. b.r., **2013**(1) [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyztuzene-termoplasty-v-letecke-konstrukci.html>
- [27] FASSIAU, Eric. *Take a PEEK: plastic parts take flight* [online]. b.r. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.solvay.com/en/asking-more/Take-a-PEEK-plastic-parts-take-flight.html>
- [28] MARSH, George. Reinforced thermoplastics, the next wave?. *Reinforced Plastics* [online]. b.r., **2014**( ) [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.materialstoday.com/composite-applications/features/reinforced-thermoplastics-the-next-wave/>
- [29] BLACK, Sara. Thermoplastic composites save weight in rotorcraft aerostructure. *Composites World* [online]. b.r. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-save-weight-in-rotorcraft-aerostructure/>
- [30] MINNEE, Hans. Planning & Control van Research & Development projecten. In: *Slideplayer* [online]. b.r. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://slideplayer.nl/slide/2076666/>
- [31] Gulfstream Doesn't Give Wings, but how About a Tail?. *Composites Manufacturing* [online]. b.r., **2010**, 3 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2010/07/gulfstream-doesnt-give-wings-tail/>
- [32] *Helping aircraft floats float better* [online]. b.r. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.plasticomp.com/helping-aircraft-floats-float-better/>
- [33] MALNATI, Peggy. Thermoplastic composites take off in aircraft interiors. *Plastics Engineering* [online]. b.r., **2016**(5) [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://read.nxtbook.com/wiley/plasticsengineering/may2016/index.html>

- [34] *Composites: Airbus continues to shape the future* [online]. b.r. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/08/composites--airbus-continues-to-shape-the-future.html>
- [35] BLACK, Sara. Thermoplastic composites “clip” time, labor on small but crucial parts. *Composites World* [online]. b.r. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-clip-time-labor-on-small-but-crucial-parts>
- [36] SLOAN, Jeff. Inside a thermoplastic composites hotbed. *Composites World* [online]. b.r. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/inside-a-thermoplastic-composites-hotbed>
- [37] SCHROETER, Kellen. *Airbus A350 XWB Internship* [online]. b.r. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://kellenschroeter.wordpress.com/2015/01/01/airbus-a350-xwb-internship/>
- [38] Thermoplastic composites gain leading edge on the A380. *Composites World* [online]. b.r. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-gain-leading-edge-on-the-a380>
- [39] GIERAS, Jacek. Electrical Ignition of Fuel-Air Mixture in Aircraft Fuel Tanks. *Przegląd Elektrotechniczny* [online]. b.r., , 17-24 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/244989196\\_Electrical\\_Ignition\\_of\\_Fuel-Air\\_Mixture\\_in\\_Aircraft\\_Fuel\\_Tanks](https://www.researchgate.net/publication/244989196_Electrical_Ignition_of_Fuel-Air_Mixture_in_Aircraft_Fuel_Tanks)
- [40] *Daher releases a thermoplastic composite wing rib* [online]. b.r. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/daher-releases-thermoplastic-composite-wing-rib>
- [41] GARDINER, Ginger. Thermoplastic composites: Inside story. *Composites World* [online]. b.r. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-inside-story>

## SEZNAM ZKRATEK

PAI	polyamidimid
PAN	polyakrylonitril
PEEK	polyetereterketon
PEI	polyeterimid
PEKK	polyeterketonketon
PES	polyetersulfon
PPS	polyfenylsulfid



## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 2.1 a) amorfnní polymer b) semikrystalický polymer [3]  
Obrázek 2.2 Závislost modulu pružnosti  $E_t$  na teplotě  $T$  u semikrystalického termoplastu [3]  
Obrázek 2.3 Závislost modulu pružnosti  $E_t$  na teplotě  $T$  u amorfnního termoplastu [3]  
Obrázek 2.4 Struktura uhlíkového vlákna [5]  
Obrázek 2.5 Znázornění synergetického efektu v kompozitu [11]  
Obrázek 2.6 Uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné b) tkanina c) rohož d) víceosé uspořádání dlouhých vláken e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná f) krátká vlákna nahodile orientovaná [6]  
Obrázek 2.7 Vazby tkanin a) plátěná b) keprová c) saténová [13]  
Obrázek 2.8 Struktura jednosměrného  
Obrázek 2.9 Struktura kvazi-izotropního  
Obrázek 2.10 Struktura sendviče s voštinovým jádrem [16]  
Obrázek 2.11 Hybridní tkaniny, zleva: uhlík/aramid, aramid/sklo, uhlík/sklo [18], [19], [20]  
Obrázek 2.12 Hybridní tkaniny s termoplastovými vlákny a) ze směsové příze b) tkanina  
Obrázek 3.1 Struktura termoplastů a reaktoplastů [25]  
Obrázek 3.2 Schematické zobrazení procesu konsolidace termoplastů [25]  
Obrázek 3.3 Autoheze termoplastů [25]  
Obrázek 3.4 Proces výroby lisováním mezi deskami [1]  
Obrázek 3.5 Lisování mezi pásy [1]  
Obrázek 3.6 Pokládání horké pásky pomocí hlavice [25]  
Obrázek 3.7 Pokládání horké pásky pomocí přítlačného válce [25]  
Obrázek 3.8 Typický proces termoformingu [25]  
Obrázek 3.9 Proces termoformingu při využití lisovnice z pryže [25]  
Obrázek 3.10 Proces tvarování metodou Hydroforming [1]  
Obrázek 3.11 Tváření membránou při použití lisu [1]  
Obrázek 3.12 Tváření membránou v autoklávu [1]  
Obrázek 4.1 Kryt radaru na letadle RC-135 [1]  
Obrázek 4.2 Hotová vodorovná ocasní plocha s přidělanými reaktoplastickými křídélky (červené) [29]  
Obrázek 4.3 Gulfstream G650 [30]  
Obrázek 4.4 Kormidlo letounu G650 [31]  
Obrázek 4.5 Quest Kodiak [32]  
Obrázek 4.6 Kryt plováku [33]  
Obrázek 4.7 Tvary svorek [35]  
Obrázek 4.8 Montáž svorek na trupu A350 XWB [37]  
Obrázek 4.9 Konstrukce křídla [39]  
Obrázek 4.10 Termoplastické žebro [40]  
Obrázek 4.11 Náběžná hrana křídla [8]  
Obrázek 4.12 Montáž náběžné hrany [1]  
Obrázek 4.13 Kryt úložného prostoru v letadle Boeing 737 [33]  
Obrázek 4.14 Držák opěrky [33]  
Obrázek 4.15 Prototyp opěradla [41]

## SEZNAM TABULEK

- Tabulka 2.1 Typy polymerů a jejich charakteristické teploty [1]  
Tabulka 2.2 Mechanické vlastnosti termoplastických matric [1]  
Tabulka 2.3 Složení oxidů ve skleněných vláknech [7]  
Tabulka 2.4 Mechanické vlastnosti skleněných vláken při pokojové teplotě (23 °C) [7]  
Tabulka 2.5 Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [1]  
Tabulka 2.6 Mechanické vlastnosti aramidových vláken [9]  
Tabulka 2.7 Mechanické vlastnosti prepregů s jednosměrným uspořádáním vláken [23], [24]  
Tabulka 2.8 Mechanické vlastnosti tkanin se saténovou vazbou [24]

